

中国电气工程大典编辑委员会



CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

12

船舶电气工程

主编 马伟明 张晓锋 焦 依 邹孟奇
李杰仁 周 平 陆嘉明



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



组 编

中国电工技术学会
中国机械工程学会
中国电机工程学会
中国动力工程学会
中国水力发电工程学会

《中国电气工程大典》

- 第1卷 现代电气工程基础
- 第2卷 电力电子技术
- 第3卷 电气工程材料及器件
- 第4卷 火力发电工程(上、下)
- 第5卷 水力发电工程
- 第6卷 核能发电工程
- 第7卷 可再生能源发电工程
- 第8卷 电力系统工程
- 第9卷 电机工程
- 第10卷 输变电工程
- 第11卷 配电工程
- 第12卷 船舶电气工程
- 第13卷 交通电气工程
- 第14卷 建筑电气工程
- 第15卷 电气传动自动化

ISBN 978-7-5083-7044-6



9 787508 370446 >

定价: 280.00元

CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第 12 卷

船舶电气工程

主编 马伟明 张晓锋 焦 依 邹孟奇
李杰仁 周 平 陆嘉明



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的。它是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等 15 卷。

本书为第 12 卷，船舶电气工程卷。主要内容包括船舶电机与电器、船舶电站、船舶电力系统、船舶电力推进、船舶机械电气控制、综合船桥系统、船舶电磁防护技术、船舶电磁兼容、船舶电气工艺。

本书主要供从事船舶电气设计、制造、安装、运行维护的工程技术人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国电气工程大典. 第 12 卷, 船舶电气工程 / 马伟明等主编; 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-7044-6

I. 中… II. ①马…②中… III. ①电气工程-中国②船用电气设备-电气工程-中国 IV. TM U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 055325 号

中国电力出版社出版发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月北京第 1 次印刷

880mm×1230mm 1/16 • 57.5 印张 • 2574 千字 • 1 插页

定价 280.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

中国电气工程大典

编辑委员会

- 主任：陆燕荪 原机械工业部副部长、教授级高级工程师
中国机械工程学会名誉理事长
- 陆延昌 原电力工业部副部长、教授级高级工程师
中国电机工程学会理事长
- 执行主任：周鹤良 原机械工业部电工局局长、教授级高级工程师
中国电工技术学会名誉理事长
- 宋天虎 原机械工业部科技司司长、教授级高级工程师
中国机械工程学会常务副理事长
- 副主任：潘崇义 中国电工技术学会副理事长、教授级高级工程师
- 吴玉生 中国电机工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 邴凤山 中国水力发电工程学会副理事长、教授级高级工程师
- 严宏强 中国动力工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 宗 健 中国电力出版社有限公司董事长、总经理、编审



委 员：（按姓氏笔画排列）

丁 杰	卜广全	于 龙	于坤山	于 明	于新颖	马小亮	马文忠	马伟明	马伟斌
马旭东	马济泉	马晓茜	马隆龙	丰镇平	王之杰	王为民	王正鸣	王占奎	王永骥
王成山	王兆安	王志峰	王作民	王国海	王明渝	王金元	王学伟	王泽忠	王建生
王建华	王绍武	王春华	王厚余	王炳忠	王 勇	王素英	王振铭	王 乘	王维洲
王景芹	王 强	王锡凡	王新新	王黎明	王德宽	王赞基	文习山	文劲宇	方晓燕
方 磊	尹天文	邓长胜	孔 力	孔伯汉	孔昭年	石萍萍	卢 强	卢澎湖	叶奇蓁
田东强	田培斌	史进渊	史毓珍	白少林	白俊光	白晓民	白继彬	冯江华	司马文霞
邢馥吏	戎一农	吕征宇	吕鸿达	朱庆明	朱英浩	朱宝田	朱晓明	朱家驹	朱耀泉
仲明振	任兆宏	任修明	任俊生	危师让	郇 雄	刘大明	刘广峰	刘卫宁	刘友梅
刘公直	刘文华	刘平安	刘 伟	刘仲儒	刘希清	刘 杰	刘尚明	刘国林	刘泽洪
刘建飞	刘建明	刘屏周	刘瑛岩	刘德志	齐剑波	关志成	江秀臣	江哲生	池 涌
汤 涌	汤蕴林	祁恩兰	许江宁	许忠卿	许洪华	阮江军	阮新波	阮 毅	孙才新
孙凤杰	孙成群	孙 林	孙牧海	严宏强	严陆光	严俊杰	严 萍	苏秀革	杜正春
杜毅威	杨玉岗	杨守权	杨寿敏	杨其国	杨奇逊	杨奇娟	杨怡元	杨俊智	杨 耕
杨维迅	杨 雯	杨道刚	杨德才	李 卫	李文健	李永东	李成榕	李 旭	李兴源
李安定	李 农	李若梅	李杰仁	李宝树	李定中	李 奎	李彦明	李晓明	李颂哲
李朗如	李培植	李盛涛	李崇坚	李道本	李道林	李 鹏	李 新	李肇林	李耀星
酆凤山	肖立业	肖昌汉	肖辉乾	肖湘宁	肖耀荣	吴正国	吴创之	吴运东	吴志坚
吴国平	吴质根	吴晓波	吴培豪	邱爱慈	何木云	何阿平	何金良	何梓年	何湘宁
何瑞华	佟为明	余 志	余贻鑫	邹云屏	邹金昌	邹孟奇	应百川	辛德培	辛耀中
汪继强	汪集昶	汪樵生	汪德良	沈小宇	沈 江	沈 兵	沈邱农	沈梁伟	宋文武
宋汉武	宋哲仁	迟 速	张艺滨	张文才	张玉花	张业广	张乔根	张仲超	张兆鹤
张伯明	张冶文	张启平	张 波	张 亮	张洪钟	张祖平	张勇传	张晓江	张晓锋
张 敏	张 望	张景洲	陆永平	陆宠惠	陆俭国	陆剑秋	陆祖良	陆家榆	陆嘉明
陈汉民	陈伟根	陈 仲	陈众励	陈庆国	陈 坚	陈伯时	陈国柱	陈治明	陈建飏
陈 星	陈思琦	陈 勇	陈哲良	陈恩鉴	陈雪梅	陈清泉	陈超志	陈敬超	陈辉明
陈黎平	陈德昌	陈德胜	陈德桂	邵 岚	苟锐锋	林云生	林公舒	林集明	易学勤
罗永浩	罗景华	金如麟	周小谦	周以国	周双喜	周 平	周仲仁	周远翔	周孝信
周建中	周思刚	周家启	周 娟	周锡生	郑小康	郑云之	郑永红	郑克文	郑明光
宗建华	宓传龙	孟庆东	赵玉文	赵光宙	赵 伟	赵红一	赵昌宗	赵治华	赵宗让
赵荣祥	赵相宾	赵 洁	赵 敏	赵婉君	赵 琨	赵 毅	赵黛青	荣命哲	胡方荪

胡安	胡学浩	胡振岭	胡鉴清	段善旭	段献忠	侯子良	俞忠德	俞智斌	饶芳权
施围	施鹏飞	洪元颐	姚本荣	姚尔昶	姚家祎	姚福生	贺建华	贺益康	贺湘琨
贺德馨	骆仲泱	秦和	秦裕碧	袁余军	袁建生	袁建敏	都兴有	耿英三	莫会成
贾东旭	夏立	夏祥贵	顾四行	顾国彪	钱昌燕	钱宝良	钱照明	倪维斗	徐元辉
徐凤刚	徐永法	徐兆丰	徐国政	徐洪海	徐殿国	徐铄	徐德鸿	殷禄祺	奚大华
高子瑜	高文胜	高庆国	高京生	高理迎	高培庆	郭天兴	郭国顺	郭保良	郭洁
郭振岩	郭灏	唐任远	唐炬	唐春潮	陶星明	黄少锋	黄仁乐	黄妙庆	黄其励
黄国治	黄学清	黄宝生	黄晓丽	黄崇祺	黄景湖	梅生伟	曹一家	曹惠彬	戚庆成
崔志强	崔翔	康勇	章名耀	章定邦	梁维宏	梁维燕	梁曦东	彭宗仁	葛大麟
葛少云	葛诗慧	葛蓉生	葛溪亭	葛增茂	董卫国	蒋洪德	蒋善定	韩民晓	韩英铎
惠世恩	覃大清	程天麟	程均培	程时杰	程树康	程浩忠	傅书遏	焦依	焦树建
舒惠芬	曾文星	曾正中	曾明富	曾南超	曾雁鸿	曾嵘	游亚戈	谢开贵	谢秋野
雷银照	雷清泉	满慧文	蔡崇积	管瑞良	廖胜松	廖瑞金	缪鸿兴	黎晓晖	谢秋野
薛以太	戴先中	戴庆忠	戴慧珠	魏光辉					颜渝坪



序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性新兴产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放 30 年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至 2007 年底，我国发电装机容量达 7.13 亿 kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流 1000kV、直流 ±800kV 特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入 21 世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近 2000 位专家和学者，历

时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日



前 言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放 30 年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和运用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统和信息管理系统的广泛应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术在电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约 2000 位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。

本套书的编写工作于 2004 年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过 4 年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共 15 卷约 5000 万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放 30 年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌

本 卷 前 言

船舶电气工程是关于船用电气设备和船舶电气与控制系统的设计建造理论、运行控制方法以及工程应用技术的专业学科，是电气科学与技术的重要组成部分。船舶电气工程领域涉及从设备到系统、从控制到运行、从顶层设计到安装工艺的全面、系统的专门知识，同电气科学与技术的各个领域既有联系又有区别。船舶电气工程主要研究对象为船舶以及海洋结构物（如海上石油钻井平台等）上所有与电气有关的基础理论、工程技术与运用方法，在诸如电机、电能变换、电气自动化以及电力系统保护等技术领域与陆用电气系统联系紧密，而在船舶电力推进、综合船桥系统以及船舶电磁防护等方面具有自己鲜明的特色。

我国是一个造船大国，航运大国。造船业与航运业已逐渐成为支撑我国国民经济和地区经济社会发展的支柱性产业。同时，进一步提高军用舰艇和船舶的现代化水平，建设一支强大的海军，是维护国家安全、促进社会主义建设与发展的迫切要求。电气系统是船舶的“血液系统，是船舶赖以生存的基础，船舶电气工程领域科学技术的进步将极大地促进我国造船和航运行业的发展，进一步提高海军的综合作战能力。

近年来，我国船舶电气工程领域获得了很大的发展，自主创新能力得到了很大提高。大容量、高功率密度、新型供配电网络形式船舶电力系统的研制和应用，多相整流型同步发电机、交直流混合供电双绕组发电机、高速异步发电机等船用特种电机的出现，采用现代电力电子变流技术的船舶电力推进系统的发展和应用，船舶能量管理系统及智能化能量调度技术的研究与应用，高度自动化、智能化船舶操控系统的广泛应用，以及船舶电磁兼容分析与电磁兼容设计理论的丰富，明显地提升了船舶电气工程领域的技术水平。

为充分反映船舶电气工程领域的技术进步，总结已有科研成果，普及并传播新的理论、方法和科学技术知识，《中国电气工程大典》编委会安排《船舶电气工程》作为其中一卷，组织国内十余家长期从事船舶电气领域研究或船用电气设备研制生产的高等院校、科研院所、工厂企业的百余位知名专家参与编写并完成了

编写工作。全书充分展示了船舶电气领域最新科研成果、技术数据、设计制造工艺和发展动态，可以作为船舶电气工程领域专业技术人员和高等院校相关专业师生的综合性参考书。

由于本书涉及面广，编写难度较大，虽经编写人员辛勤耕耘、认真校核，亦难免有错误疏漏之处，恳请读者指正。

编者

船舶电气

目 录

序	
前言	
本卷前言	
第1篇 概论	1
第1章 船舶电气工程概述	3
第2章 船舶综合电力系统概述	5
1 船舶综合电力系统的基本概念	5
1.1 综合电力系统的定义	5
1.2 综合电力系统的结构和功能	5
2 综合电力系统的模块组成	5
2.1 发电模块	5
2.2 配电模块	5
2.3 电力变换模块	6
2.4 推进模块	6
2.5 日用负载模块	7
2.6 储能模块	7
2.7 电能控制模块	8
第3章 船舶电气设备的使用条件	9
1 概述	9
2 环境条件参数及其应用指南	9
3 船级社对船舶环境条件的要求	13
3.1 气候环境条件	13
3.2 化学和机械活性物质条件	14
3.3 机械环境条件	14
3.4 生物环境条件	14
4 船舶电气设备的环境条件试验	14
4.1 环境条件试验	14
4.2 各种电气、电子设备环境条件试验项目	14
4.3 各种电气、电子设备环境条件试验的试验参数和试验方法标准	15
5 舰船电气设备的使用条件	17
第4章 船舶电能质量	18
1 电能质量的定义及分类	18
1.1 电能质量的定义	18
1.2 电能质量的分类	18
1.3 电能质量现象描述	19
2 船舶电能界面要求	24
2.1 电制	24
2.2 船舶电力界面品质要求	24
3 船舶电能质量的要求	25
3.1 交流电力系统的电能质量要求	25
3.2 直流电力系统的电能质量要求	27
参考文献	29
第2篇 船舶电机与电器	31
第1章 船用电机	33
1 概述	33
1.1 用途	33
1.2 简要发展历史	33
1.3 船用电机特点	33
1.4 船用电机产品的共同要求	33
2 船用同步发电机	35
2.1 船用同步发电机的定额	35
2.2 结构特点	36
2.3 励磁方式	37
2.4 电气性能特殊要求	38
3 舰(船)用交流三相异步电动机	42
3.1 船用三相异步电动机	42
3.2 舰用三相异步电动机	49
4 船用直流电机	55
4.1 船用直流发电机	55
4.2 充电(调压)直流发电机	56
4.3 船用直流电动机	56
4.4 电力推进直流电动机	57
4.5 甲板机械直流电动机	57
4.6 幅压直流电动机	57
5 船用电机标准信息	58
第2章 船用电器	59
1 概述	59
1.1 船用低压电器的主要类别	59
1.2 船用低压电器的分类与用途	59
1.3 正常工作条件	59
1.4 污染等级	60
1.5 型号编制方法	60
1.6 船用低压电器的主要标准	62
1.7 舰用低压电器主要标准	63
2 刀开关和刀形转换开关	64
2.1 HZ910 系列船用组合开关	64
2.2 HZ910M 系列气密式组合开关	65
2.3 3LB(J)系列组合开关	65
2.4 HC300/24 隔离开关	67
2.5 HC91 型系列船用电磁转换开关	67
2.6 H-HC91 系列舰用电磁转换开关	68
3 熔断器	68
3.1 RL96 船用螺旋式熔断器	68
3.2 RLDJ1 型艇用直流螺旋式熔断器	68
3.3 H-RL4 型舰用直流螺旋式熔断器	70
3.4 H-RL3(RL93)系列舰用螺旋式熔断器	70
3.5 H-STF901 系列舰用有填料封闭管式快速熔断体	71
3.6 H-HG30-32 舰用熔断器式隔离器	71
4 船用低压断路器	72
4.1 用途和主要类型	72
4.2 设计和结构特点	72
4.3 断路器的选用	73
4.4 断路器的维护检修	74
4.5 船用断路器典型技术数据	75
5 船用控制器	90
6 接触器	91

6.1 基本原理	91	6.1 范围	125
6.2 设计要点	91	6.2 技术要求	125
6.3 解决措施	91	6.3 选型要点	125
6.4 国内产品	91	7 船用防爆照明灯	125
6.5 选用	93	7.1 范围	125
6.6 使用	93	7.2 技术要求	125
7 起动器	93	7.3 选型要点	125
7.1 设计要点	93	8 船用消防应急灯	126
7.2 国内产品	94	8.1 范围	126
8 控制继电器	95	8.2 技术要求	126
8.1 船用热继电器	95	8.3 选型要点	127
8.2 GG-21 型逆功率继电器	102	9 手提式船用水密搜索灯(救生艇用)	128
8.3 JN 系列逆流继电器	103	9.1 范围	128
8.4 ZFB92、ZFB93(GENOP)发电机过流 逆功率保护装置	104	9.2 技术要求	128
9 主令电器	105	9.3 选型要点	128
9.1 控制按钮	105	10 其他灯具(手提灯、海图灯)	128
9.2 行程开关	107	10.1 范围	128
9.3 限位开关	107	10.2 技术要求	128
9.4 万能转换开关	108	10.3 选型要点	128
9.5 船用主令控制器	110	第4章 船用日用电器	129
10 电阻器	112	1 电取暖器	129
10.1 Z X915 系列船用电阻器	112	1.1 范围	129
10.2 ZD 系列船用电阻器	114	1.2 技术要求	129
11 船用变阻器	114	1.3 选型要点	129
11.1 BL91 系列船用励磁变阻器	114	2 电炊具	129
11.2 BL9 系列船用励磁变阻器	115	2.1 范围	129
12 舰船用电磁铁	115	2.2 技术要求	129
12.1 概述	115	2.3 选型要点	129
12.2 分类	115	3 电热水器	129
12.3 具体产品	116	3.1 范围	129
第3章 船用灯具	119	3.2 技术要求	129
1 船用电气号灯	119	3.3 选型要点	130
1.1 范围	119	4 电风扇	130
1.2 技术要求	119	4.1 范围	130
1.3 电气号灯的供电与控制	120	4.2 技术要求	130
1.4 号灯的配备	120	4.3 选型要点	130
1.5 号灯的安装	122	5 电冰箱	130
1.6 选型要点	122	5.1 范围	130
2 船用白昼信号灯	122	5.2 技术要求	130
2.1 范围	122	5.3 选型要点	130
2.2 技术要求	123	6 日用灯具	131
2.3 选型要点	123	6.1 范围	131
3 船用信号灯	123	6.2 技术要求	131
3.1 范围	123	6.3 选型要点	131
3.2 技术要求	123	7 电动切面机	131
3.3 选型要点	123	7.1 范围	131
4 船用投光灯(探照灯)	123	7.2 技术要求	131
4.1 范围	123	7.3 选型要点	132
4.2 技术要求	123	8 烘干机	132
4.3 选型要点	124	8.1 范围	132
5 船用荧光照明灯	124	8.2 技术要求	132
5.1 范围	124	8.3 选型要点	132
5.2 技术要求	124	9 臭氧发生器	132
5.3 选型要点	125	9.1 范围	132
6 船用白炽照明灯	125	9.2 技术要求	132
		9.3 选型要点	132

第5章 船用电缆	133
1 概述	133
1.1 船用电缆选用原则	133
1.2 船用电缆的安装与敷设	134
1.3 船用电缆的维护	138
2 船用电缆分类和命名	138
2.1 代号	138
2.2 表示方法	139
3 船用电力电缆	139
3.1 产品规格和结构尺寸	139
3.2 计算外径和单位长度质量	139
3.3 性能指标	140
4 船用控制电缆	144
4.1 产品规格和结构尺寸	144
4.2 计算外径和计算质量	145
4.3 性能指标	145
5 船用通信电缆	145
5.1 产品规格和结构尺寸	145
5.2 计算外径和计算质量	145
5.3 性能指标	145
6 船用射频电缆	146
6.1 产品规格与结构尺寸	146
6.2 计算外径与计算质量	147
6.3 性能指标	147
7 船用耐火电缆	149
8 船用电缆特殊试验方法	149
8.1 浸水电容试验	149
8.2 水密性试验	149
8.3 镀锌钢丝镀层附着性试验	150
9 船用电缆载流量	150
9.1 单根电缆连续工作制的载流量	150
9.2 不同环境温度的修正系数	151
9.3 成束电缆的修正系数	151
9.4 非连续工作制的修正系数	151
第6章 船用变压器	152
1 船用变压器的类型	152
1.1 概述	152
1.2 船用变压器分类	152
1.3 型号说明	152
1.4 满足的标准	152
1.5 使用条件	152
1.6 温升限值	152
1.7 材料要求	152
1.8 结构	152
2 船用特种变压器	153
3 船用变压器的性能参数	153
3.1 船用单相变压器的性能参数	153
3.2 船用三相变压器的性能参数	153
3.3 海洋平台三相树脂绝缘变压器的性能参数	153
3.4 其他规定	154
4 船用变压器重量、外形及安装尺寸	155
4.1 船用单相变压器(防水式)	155
4.2 船用单相变压器(防滴式)	155
4.3 船用三相变压器	155
4.4 海洋平台变压器	155

第3篇 船舶电站	157
第1章 概述	159
1 船舶电站的用途和分类	159
1.1 用途	159
1.2 功能分类	159
1.3 原动机类型分类	159
2 船舶电站的组成	159
2.1 配置和组成设备	159
2.2 各组成设备间的接口关系	159
3 船舶电站的设计	159
3.1 基本原则	159
3.2 船舶电站的参数和指标	160
3.3 成套性设计	161
3.4 电站保护设计	161
3.5 安全性设计	164
3.6 可靠性设计	164
3.7 电站的自动化设计	164
3.8 技术发展趋势	165
4 船舶电站的成套和试验	165
4.1 成套目的和任务	165
4.2 成套试验的试验文件	166
4.3 技术参数调整	166
4.4 成套试验	166
第2章 船用发电机组	167
1 概述	167
1.1 用途	167
1.2 分类	167
2 柴油发电机组	167
2.1 基本原理	167
2.2 参数和指标	168
2.3 原动机的选型	169
2.4 功率匹配性设计	170
2.5 结构设计	170
2.6 成套性设计	170
2.7 隐身性设计	172
2.8 稳定性设计	173
2.9 安全性设计	174
2.10 自动化设计	175
2.11 参数设定与调整	176
2.12 机组的试验、使用和维护	176
3 汽轮发电机组	177
3.1 基本原理	177
3.2 参数和指标	177
3.3 原动机的选型	178
3.4 功率匹配性设计	178
3.5 热循环设计	179
3.6 回热系统设计	180
3.7 凝汽冷却装置	182
3.8 结构设计	183
3.9 稳定性设计	185
3.10 安全性设计	186
3.11 自动化设计	187
3.12 参数设定与调整	187
4 燃气轮机发电机组	188
4.1 基本原理	188

4.2 参数和指标	189	4.3 应用和发展	211
4.3 原动机特性	189	5 船用燃料电池	212
4.4 热力循环设计	190	5.1 燃料电池的原理及分类	212
4.5 成套性设计	191	5.2 燃料电池在船舶上的应用前景	212
4.6 特种型式的燃气轮机组合	191	6 船用锂离子电池	213
第3章 船用特种电源	193	6.1 原理及特性	213
1 概述	193	6.2 分类及选型	213
2 变流机组	193	6.3 结构和制造工艺	213
2.1 工频变流机组的结构及其工作原理	193	6.4 使用及维护	214
2.2 中频变流机组的结构及其工作原理	193	6.5 应用和发展	214
3 轴带发电机	194	第5章 船用配电板	215
3.1 频率变动型轴带发电机的原理及分类	194	1 概述	215
3.2 频率稳定型轴带发电机的原理及分类	194	1.1 功能和组成	215
4 感应子中频发电机	195	1.2 分类	215
4.1 感应子发电机的特点	195	2 船用配电板的结构设计	215
4.2 感应子发电机的结构及分类	195	2.1 防护等级	215
4.3 感应子中频发电机的工作原理	196	2.2 安装方式	216
5 多相整流型同步发电机	196	2.3 船用配电板的结构设计要点	216
5.1 多相整流同步发电机结构原理	196	3 船用配电板的电气设计	217
5.2 十二相整流同步发电机的运行性能与特点	197	4 主配电板	219
6 交直流电力集成双绕组发电机	197	4.1 主配电板原理图设计	219
6.1 双绕组发电机的基本结构和原理	197	4.2 主配电板布置图设计	221
6.2 直流电压脉动和交流电压波形畸变	197	5 负载中心	223
6.3 双绕组发电机供电系统的稳定性	198	6 区配电板	223
7 感应发电机	198	7 分配电板	223
7.1 传统感应发电机	198	8 舱室配电板	223
7.2 新型感应发电机	199	9 可靠配电板	223
7.3 12/3 相双绕组感应发电机	199	10 应急配电板	223
8 船用交流静止电源	201	11 蓄电池充放电板	224
8.1 逆变电源的原理、分析、设计	201	12 照明分配电板	224
8.2 逆变装置的并联运行	203	13 岸电箱	224
9 船用直流静止电源	203	14 船用配电板检验	224
9.1 相控整流电源	203	14.1 船用配电板的检验	224
9.2 高频整流电源	204	14.2 型式试验	224
9.3 DC-DC 开关电源	204	14.3 出厂试验	225
第4章 船用电池	206	14.4 系统试验和航行试验	225
1 概述	206	15 船用配电板相关标准	225
1.1 电池的原理、组成和分类	206	第6章 船舶电站的监测与控制	226
1.2 电池的主要技术特性	206	1 概述	226
1.3 电池在船舶中的应用和发展	206	1.1 用途	226
2 船用铅酸电池	207	1.2 种类与特点	226
2.1 原理及特性	207	1.3 工作原理	226
2.2 分类及选型	207	2 船舶电站的检测与控制系统的要求	226
2.3 设计与制造	207	2.1 环境适应性要求	226
2.4 使用和维护	208	2.2 功能模块和独立性要求	226
2.5 应用和发展	208	2.3 计算机系统的要求	227
3 船用锌-氧化银电池	209	2.4 传感执行元件的要求	227
3.1 工作原理	209	2.5 计算机网络和现场总线的要求	227
3.2 组成和结构	209	3 船舶电站检测与控制的设计	227
3.3 工作特性	209	3.1 硬件选型	227
3.4 使用和维护	209	3.2 软件选型	228
3.5 应用和发展	210	3.3 硬件接口设计	228
4 船用水激活电池	210	3.4 应用软件编程	228
4.1 工作原理和分类	210	3.5 结构设计	228
4.2 组成、结构及性能特点	211	3.6 电磁兼容性设计	228
		3.7 安全性设计	228

3.8 可靠性设计	228	2.5 电动机馈送的短路电流	266
4 控制系统的设计和试验	229	2.6 在邻近主汇流排处短路时短路电流的计算 ...	266
4.1 功能和参数	229	2.7 在主汇流排外馈电线处短路时	
4.2 参数设定与调整	231	短路电流的计算	266
4.3 试验	231	2.8 短路功率因数的计算	267
4.4 使用和维护	231	2.9 电抗、电阻、阻抗和时间常数的	
4.5 技术发展趋势	231	计算与换算	268
5 安全系统的设计和试验	232	3 同步发电机的保护	268
5.1 功能和参数	232	3.1 过载保护	268
5.2 参数的设定与调整	232	3.2 外部短路保护	268
6 监测报警系统的设计和试验	232	3.3 逆功率保护	268
6.1 设计依据	232	3.4 欠电压保护	268
6.2 设计准则	232	3.5 船舶中压同步发电机的保护	269
6.3 可靠性原则	232	4 船舶交流电网的继电保护	270
6.4 设计内容	232	4.1 大容量交流电网的继电保护	270
6.5 设计方法	232	4.2 小容量交流电网的继电保护	272
参考文献	234	4.3 照明系统的保护	273
第4篇 船舶电力系统	235	5 船舶直流电力系统的继电保护	273
第1章 船舶电力网络	237	5.1 发电机电路的保护	273
1 船舶电力系统及网络结构	237	5.2 直流电网的继电保护	273
1.1 船舶电力系统的基本要求	237	5.3 特别说明	274
1.2 船舶电力系统的类型	237	6 设备的保护	275
1.3 船舶电力系统特点	239	6.1 电动机的保护	275
1.4 船舶电力网络结构	239	6.2 变压器的保护	275
2 船舶电力网络的计算	241	6.3 蓄电池的保护	276
2.1 电力网络的等效电路	241	第3章 船舶电能质量分析与控制	277
2.2 电压降和功率损耗的计算	241	1 船舶电网电能质量分析方法	277
2.3 电力负荷的计算	242	1.1 船舶电网电能质量特点分析	277
3 船舶配电系统	244	1.2 船舶电网电能质量指标	280
3.1 船舶配电系统的组成、功能及一般要求	244	2 船舶电网电能质量参数的测量	284
3.2 船舶主配电系统	245	2.1 电力系统电能质量参数的测量方法	284
3.3 船舶应急配电系统	246	2.2 用于电能质量评估的新设备	288
3.4 船舶事故配电系统	247	3 船舶电网电能质量的控制	289
3.5 交流中压配电板和控制设备特殊要求	247	3.1 进行电能质量控制的必要性	289
4 船舶电力母线与电缆的选择	248	3.2 船舶电网电能质量的改善方法	292
4.1 船舶电力系统母线的设计	248	4 用于船舶电网测量与控制的设备及	
4.2 船用电缆的计算和选择	254	相关的规范规定	298
5 船舶区域配电系统	256	4.1 船舶电网参数测量装置	298
5.1 径向式配电与区域配电的比较	257	4.2 船级社对船舶测量与控制设备的规定	301
5.2 船舶区域配电系统	257	第4章 船舶电力系统分析与仿真	303
6 船舶电力网络的重构与故障恢复	258	1 船舶电力系统元件数学模型	303
6.1 船舶电力系统网络重构的概念	258	1.1 特种发电机模型(十二相整流发电机模型、	
6.2 船舶电力系统网络重构方法	259	双绕组发电机模型)	303
6.3 网络重构相关技术	259	1.2 励磁系统数学模型	306
第2章 船舶电力系统保护	261	1.3 负荷数学模型	307
1 船舶电力系统保护的基本要求	261	1.4 参数辨识	308
1.1 保护的必要性和一般方法	261	1.5 船舶电力系统负荷预估	308
1.2 对保护的原则要求	261	2 船舶电力系统的潮流计算方法	309
1.3 对保护的具体要求	262	2.1 基本假设	309
1.4 选择保护装置的要求	262	2.2 计算方法及步骤	309
2 船舶电力系统短路电流计算	263	3 船舶电力系统电磁暂态分析与仿真	310
2.1 名词术语	263	3.1 十二相发电机突然短路电流分析	310
2.2 计算用符号和代号	263	3.2 船舶电力系统电磁暂态时域仿真	311
2.3 通则	265	4 船舶电力系统稳定性分析	312
2.4 发电机馈送的短路电流	266	4.1 静态稳定性分析	312
		4.2 几种特殊工况下船舶电力系统稳定性分析 ...	313

5 船舶电力系统全数字实时仿真	314	7.1 船舶电力推进装置设备试验	361
5.1 船舶电力系统实时仿真概述	314	7.2 船舶电力推进装置的陆上联调试验	362
5.2 电力系统实时仿真算法	316	7.3 船舶电力推进装置的系泊试验	363
5.3 船舶密集节点电力系统实时仿真的 解耦处理方法	317	7.4 船舶电子推进装置的航行试验	363
5.4 实时仿真系统与外部设备的接口关系	317	第3章 船舶推进电机	364
参考文献	318	1 船舶推进电机的特点和要求	364
第5篇 船舶电力推进	323	1.1 推进电机的特点	364
第1章 概述	325	1.2 船舶推进电机分类	364
1 船舶电力推进技术发展综述	325	1.3 船舶推进电机的要求	365
1.1 电力推进发展简史	325	2 船舶推进电机的设计和结构	366
1.2 电力推进的优点	326	2.1 船舶推进电机的设计	366
1.3 电力推进的局限性	326	2.2 船舶推进电机的结构	366
2 船舶电力推进系统的构成与分类	326	3 船舶推进电机的绝缘	367
2.1 电力推进系统的构成	326	3.1 绝缘结构	367
2.2 电力推进系统的分类	326	3.2 电枢	368
3 船舶电力推进对设备的要求	327	3.3 主要绝缘材料和使用工艺	368
3.1 电力推进设计一般步骤及内容	327	3.4 发展方向	369
3.2 电力推进一般要求	327	4 船舶推进电机的发热和冷却	369
3.3 对供电与推进系统的要求	328	4.1 船舶推进电机的发热	369
3.4 对监测与控制要求	328	4.2 船舶推进电机的通风冷却	369
3.5 维护保养要求	329	4.3 船舶推进电机的其他冷却方式	371
4 船舶电力推进的典型方案	329	5 船舶推进电机减振降噪	372
4.1 采用 PWM 变频器的驱动装置	329	5.1 振动	373
4.2 采用电流源变换器的驱动	330	5.2 噪声	373
第2章 船舶电力推进装置	331	5.3 振动源与噪声源的抑制	373
1 船舶电力推进系统的设计	331	6 船用推进电机可靠性、维修性和 安全性设计准则	374
1.1 船舶电力推进系统的负载特性	331	6.1 可靠性设计准则	374
1.2 船舶电力推进系统的技术要求	332	6.2 维修性设计准则	375
1.3 船舶直流电力推进系统的分析与计算	332	6.3 安全性设计准则	375
2 船舶电力推进控制	335	7 船舶直流推进电机	376
2.1 主推和辅推的电力传动	335	7.1 特性与要求	376
2.2 恒速电动机的直接驱动	336	7.2 结构特点	376
2.3 直流电力推进控制	337	7.3 设计特点	377
2.4 船舶交流电力推进控制	338	7.4 维护保养	378
3 电力推进装置的过渡过程	340	8 船舶永磁推进电动机	378
3.1 研究电力推进装置过渡过程的方法	341	8.1 基本原理、分类	378
3.2 电力推进装置的数学模型	341	8.2 径向磁通永磁推进电机	379
3.3 电力推进装置状态方程的数值解法	343	8.3 轴向磁通永磁推进电机	379
3.4 电力推进装置过渡过程的分析与计算举例	343	8.4 横向磁通永磁推进电机	380
4 船舶电力推进的安全性保护	346	9 交流推进电机	380
4.1 电力推进系统安全性设计	346	9.1 特点	380
4.2 电力推进系统电气设备安全	347	9.2 类型	380
4.3 电力推进系统保护设计要求	348	9.3 电磁设计	381
5 船舶电力推进用开关电器	350	9.4 结构设计	382
5.1 概述	350	10 船舶推进电机试验	382
5.2 船用直流空气断路器、转换开关	350	10.1 试验项目	382
5.3 灭磁开关	353	10.2 试验条件及设备	383
5.4 直流接触器	355	第4章 船舶电力推进的变流与调速	384
6 船舶电力推进装置的结构	356	1 船舶电力推进的变流技术	384
6.1 推进装置的设置和结构形式	356	1.1 新型大功率电力电子器件	384
6.2 船舶电力推进装置结构的环境适应性	357	1.2 推进变流器类型与技术特点	384
6.3 船舶电力推进装置控制板结构	358	1.3 推进变流器的相关问题与技术途径	388
6.4 船舶电力推进集控装置结构	360	1.4 船舶电力推进变流器的选择	390
7 船舶电力推进试验	361	2 船舶直流推进调速系统	390
		2.1 直流电机推进调速系统	390

2.2 无刷直流永磁电机推进调速系统	393	4 船舶电力推进监测与控制系统方案实例	424
3 船舶交流电机推进调速系统	396	4.1 某船电力推进监控系统设计	424
3.1 同步电动机推进调速系统	396	4.2 采用 CAN 总线的多相推进电机控制系统 ...	426
3.2 异步电机推进调速系统	398	参考文献	428
第 5 章 特种电力推进装置	401	第 6 篇 船舶机械电气控制	429
1 船舶侧推装置	401	第 1 章 船舶电气传动与控制	431
1.1 船舶侧推装置的工作原理	401	1 船舶电气传动及控制的基本要求	431
1.2 船舶侧推装置控制系统的组成和原理	401	1.1 技术性能及船级社规范要求	431
1.3 船舶侧推装置的典型控制系统	403	1.2 环境条件要求	431
1.4 船舶侧推装置的选用要点	404	1.3 对电流电压和频率波动的适应要求	431
1.5 侧推力器的设计举例	405	1.4 电磁兼容性要求	432
2 船舶吊舱式电力推进	405	1.5 电气安全性要求	432
2.1 船舶吊舱式电力推进的基本原理	405	1.6 可靠性要求	433
2.2 船舶吊舱式电力推进的性能和特点	405	2 电动机的选择	434
2.3 吊舱式电力推进器的适用范围	406	2.1 选择电动机的基本思路	434
2.4 吊舱式对转螺旋桨(CRP)系统的结构 原理和特点	406	2.2 几种主要船用电动机分类及性能特点	434
2.5 主要产品	406	2.3 电气传动的基本运动方程式	434
2.6 发展应用	407	2.4 船舶机械的负载特性	434
3 船舶超导电力推进	407	2.5 船舶机械的工作制	435
3.1 船舶超导电力推进装置的发展	407	2.6 电动机的工作制	435
3.2 相关的超导电性概念简述	407	2.7 电动机的发热与温升	435
3.3 超导电力推进系统	408	2.8 电动机的机械特性	436
3.4 超导推进电机	409	2.9 电动机功率计算的基本公式	436
3.5 船舶超导电力推进系统方案设计示例	410	2.10 电动机选择校验	439
3.6 超导综合全电力推进	411	2.11 船舶用电动机系列及应用范围	442
4 船舶磁流体电力推进装置	411	3 电动机的起动、制动及调速方式选择	443
4.1 推进原理与主要潜在特点	411	3.1 电动机的起动	443
4.2 推进型式和船舶总体组成	411	3.2 电动机的制动	446
4.3 超导 MHD 推进主要关键技术及超导船 总体设计概要	412	3.3 电力电子变流技术	448
4.4 超导 MHD 推进潜在应用示例	414	3.4 交流调速	451
4.5 超导 MHD 推进技术发展的历程及前景	415	3.5 直流调速	454
5 船舶的喷泵和泵喷推进装置	416	3.6 电气保护	455
5.1 喷水(喷泵)推进	416	4 自动控制系统	460
5.2 泵喷推进	418	4.1 继电-接触器控制	460
第 6 章 船舶电力推进的监测与控制	419	4.2 无触点控制	464
1 船舶电力推进监控概述	419	4.3 可编程序控制器	464
1.1 船舶电力推进监测与控制技术现状	419	4.4 随动系统	466
1.2 船舶电力推进监测与控制技术 发展与影响	419	5 船舶电气传动系统的计算机控制	470
2 船舶电力推进监测与控制系统设计要求	420	5.1 计算机控制系统的组成、 基本原理与特点	470
2.1 环境要求	420	5.2 常用数字控制器设计	471
2.2 安装要求	420	5.3 计算机控制系统的设计步骤	471
2.3 绝缘耐压要求	420	6 船舶机械电气控制设备的设计、 安装、调试	473
2.4 工作电源要求	420	6.1 船舶机械电气控制设备的设计	473
2.5 主要功能性能要求	421	6.2 电气控制设备的安装调试	474
2.6 监控系统网络的要求	421	第 2 章 船舶甲板机械电气控制	476
2.7 监控系统用传感器的要求	421	1 船舶起货机的电气传动控制	476
2.8 控制软件基本要求	421	1.1 船舶起货机的类型及特点	476
3 船舶电力推进监测与控制系统设计	421	1.2 电动起货机的结构和运行特性	476
3.1 方案的初步制订	421	1.3 交流电动起货机控制线路	477
3.2 监测与控制网络设计	421	1.4 PLC 控制三速交流起货机控制系统	480
3.3 监测与控制系统设计	422	1.5 电动液压起货机	480
3.4 监测与控制系统软件设计	423	2 船舶锚机、绞缆机电气传动控制	481
3.5 人机界面设计	423	2.1 起锚系缆机械的类型及运行特点	481

2.2 锚机绞缆机电力拖动控制系统的基本要求	483
2.3 船舶起锚系缆机械电动机容量的计算	483
2.4 电动系泊绞车和锚机电气控制线路	485
3 船舶舵机的电气传动控制	487
3.1 舵机装置	487
3.2 舵机装置对电力拖动控制的要求	488
3.3 液压舵机电动机容量的计算	488
3.4 舵机装置电力拖动与控制线路	489
第3章 船舶舱室机械电气控制	491
1 船舶空气调节装置的电气控制	491
1.1 主要控制功能	491
1.2 船舶空气调节装置分类及其电气控制系统的工作原理和特性	491
1.3 船舶空气调节装置的电气控制技术	493
1.4 技术性能	494
1.5 主要电气设备和控制元件的选型	495
2 船舶冷藏装置的电气控制	495
2.1 主要控制功能	495
2.2 船舶冷藏装置分类及其控制系统的工作原理及特性	495
2.3 船舶冷藏装置的电气控制技术	496
3 船舶冷水机组的电气控制	497
3.1 主要控制功能	497
3.2 船舶冷水机组分类及其控制系统的工作原理和特性	497
3.3 船舶冷水机组的电气控制技术	500
4 船舶海水淡化装置的电气控制	500
4.1 主要控制功能	500
4.2 船舶海水淡化装置的电气控制技术	500
5 船舶辅锅炉的电气控制	501
5.1 主要控制功能	501
5.2 船舶辅锅炉分类及其控制系统的工作原理特性	502
5.3 船舶辅锅炉的电气控制技术	502
5.4 船舶辅锅炉控制系统的技术性能	502
5.5 主要电气设备和控制元件的选型	502
6 船舶生活污水和油污水处理装置的电气控制	502
6.1 主要控制功能	502
6.2 船舶生活污水和油污水处理装置分类及其控制系统的工作原理及特性	503
7 船舶膜空分制氮装置的电气控制	506
7.1 主要控制功能	506
7.2 船舶膜空分制氮控制系统的工作原理	506
7.3 船舶膜空分制氮装置的电气控制技术	507
7.4 技术性能	507
8 船舶用泵的电气控制	507
8.1 种类及其用途	507
8.2 电气控制的主要技术指标	508
8.3 电动机的选择	508
8.4 电气控制方式设计	508
8.5 船用消防排水泵组电气控制实例	509
9 船舶空压机电气控制	510
9.1 种类及其用途	510
9.2 电气控制的主要技术指标	510

9.3 电动机的选择	510
9.4 船舶空气压缩机组的电气控制实例	511
第4章 船舶特种机械电气控制	513
1 船舶减摇鳍电气控制	513
1.1 类型及工作特点	513
1.2 结构和运行特性	513
1.3 主要技术性能	515
1.4 电气传动控制的主要元器件的选用	515
1.5 电气控制设计	516
2 船舶减摇水舱电气控制	516
2.1 减摇水舱的分类	516
2.2 减摇水舱的基本原理	516
2.3 被动可控式减摇水舱的控制系统组成	517
3 船用稳定平台电气控制	517
3.1 船用稳定平台	517
3.2 稳定平台系统的基本组成	518
3.3 平台的精度与结构设计	518
3.4 设计准备阶段应确定的主要技术指标与接口关系	519
3.5 电动机的选择	519
3.6 齿轮减速比的选择	519
3.7 运动部件机械谐振的影响	519
3.8 角度测量器件和伺服放大器选择	519
3.9 若干细节与现场调试	519
4 船舶调距桨装置电气控制	520
4.1 船舶调距桨装置系统组成	520
4.2 调距桨装置的电气控制	520
4.3 船舶调距桨装置的控制方式	523
5 舵桨装置电气控制	524
5.1 舵桨装置系统组成	524
5.2 舵桨装置操舵系统	525
6 船用电梯电气控制	526
6.1 船用电梯的分类及构成	526
6.2 船用电梯电气控制系统的主要技术要求	526
6.3 船用电梯的电力拖动	526
6.4 船用电梯的控制	527
6.5 船用电梯的微机控制	529
第5章 电磁弹射装置	530
1 弹射装置	530
2 系统组成	531
2.1 储能系统	531
2.2 动力调节系统	533
2.3 直线电动机	535
2.4 运控系统	536
3 永磁无刷型电磁弹射器	537
3.1 结构	537
3.2 工作原理	538
3.3 主要技术指标	539
3.4 设计特点	540
4 直线感应型电磁弹射器	541
4.1 结构	541
4.2 工作原理	542
4.3 主要技术指标	543
4.4 设计特点	543
参考文献	544

第7篇 综合船桥系统	545	3.1 VAF 型燃油黏度控制系统	590
第1章 概述	547	3.2 NAKAKITA 型燃油黏度控制系统	592
1 背景	547	3.3 VISCOCHIEF 燃油黏度自动控制系统	595
2 定义	547	4 自清洗过滤器自动控制系统	596
3 基本原理	547	4.1 自身液流自动反冲洗过滤器	596
4 基本功能	547	4.2 气体辅助自动反冲洗过滤器	597
5 基本组成	548	4.3 主要技术指标	598
6 典型产品	549	5 分油机自动控制系统	598
6.1 美国斯佩里公司 VT2100 型综合 船桥系统	549	5.1 控制系统的主要单元	600
6.2 德国 STN 阿特拉斯电子公司的新一代 综合船桥系统	550	5.2 自动排渣排水顺序控制	600
第2章 船舶主机遥控	551	5.3 程序时刻表	600
1 船舶主机遥控系统工作模式及控制要求	551	5.4 油温控制与工况监测	601
1.1 船舶主推进装置运行模式	551	5.5 主要技术指标	601
1.2 操作部位、操纵方式和操作部位转换	552	6 油水分离器自动控制系统	601
1.3 控制系统与控制对象接口	552	6.1 油水分离系统的组成	601
1.4 控制系统基本工作原理及组成	554	6.2 自动排油控制	602
2 船舶主机遥控系统的基本控制功能	556	6.3 油分浓度检测装置	602
2.1 主机起动停车	556	6.4 主要技术指标	603
2.2 主机转速调节	558	第4章 船舶导航与通信	604
2.3 换向	559	1 陀螺导航	604
2.4 机桨联动	559	1.1 概述	604
2.5 负载程序控制	560	1.2 基本原理	604
2.6 负载限制	560	1.3 系统构成	605
2.7 安全保护	561	1.4 典型产品介绍及注意事项	607
2.8 应急操纵	561	2 卫星导航	608
2.9 系统报警及自检	562	2.1 概述	608
3 船舶主机遥控系统的常用部件	562	2.2 基本原理	608
3.1 车令发讯器	562	2.3 系统构成	609
3.2 控制单元	564	2.4 GPS 全球定位系统	609
3.3 气动阀件	565	3 无线电导航	612
3.4 电/气转换器	569	3.1 概述	612
3.5 调速器及执行机构	570	3.2 基本原理	612
4 船舶主机遥控系统设计	573	3.3 长河二号系统	615
4.1 常用设计规范及标准	573	4 声纳导航	616
4.2 系统主要性能指标	573	4.1 概述	616
4.3 设备工作环境条件	575	4.2 基本原理	616
4.4 输入输出及接口标准	576	4.3 典型产品介绍及指标	617
4.5 船舶主机遥控系统可靠性设计原则	577	5 雷达导航	617
4.6 安全性设计	577	5.1 概述	617
5 几种典型的船舶主机遥控系统	578	5.2 雷达分类	617
5.1 小型船舶主机遥控系统	578	5.3 脉冲式雷达基本原理	618
5.2 定距桨船舶主机遥控系统	580	5.4 国内外同类产品的现状	619
5.3 调距桨船舶主机遥控系统	583	6 综合导航系统	619
5.4 双机并车船舶主机遥控系统	583	6.1 概述	619
第3章 船舶机舱自动化	586	6.2 基本原理	620
1 船舶机舱自动化的基本结构与要求	586	6.3 系统构成	620
1.1 船舶机舱自动化的基本结构	586	6.4 典型产品介绍及指标	623
1.2 船舶机舱自动化的基本要求	586	6.5 注意事项	625
1.3 控制系统	587	7 无线电告警	625
2 柴油机冷却水温度自动控制系统	587	7.1 无线电航行警告系统	625
2.1 MR-II 型电动冷却水温度控制系统	587	7.2 中国航行警告系统	626
2.2 ENGARD 型冷却水温度控制系统	588	7.3 GMDSS 在中国的发展及应用	626
3 燃油黏度自动控制系统	590	8 普通导航设备	627
		8.1 基础知识	627
		8.2 磁罗经	627
		8.3 六分仪	628

8.4 其他导航方式	628
9 船舶通信系统	628
9.1 概述	628
9.2 船舶通信系统的配备	629
9.3 船舶通信信息传输方式及其选择	629
9.4 Inmarsat—C 系统	630
9.5 GMDSS 系统	630
9.6 船舶通信设备的日常维护	631
9.7 通信天线的安装和维护	631
第 5 章 船舶操纵及控制	632
1 舵机及航向控制	632
1.1 舵机简单控制	632
1.2 舵机随动控制	632
1.3 船舶航向控制	633
1.4 航向控制系统设计	634
1.5 常用自动舵介绍	635
2 航迹控制	636
2.1 航迹控制的概念	636
2.2 航迹控制系统的组成	636
2.3 航迹控制系统的性能要求	637
2.4 航迹控制器的设计	638
2.5 典型的航迹控制系统介绍	639
3 深度与均衡控制	640
3.1 深度控制原理	640
3.2 均衡控制原理	640
3.3 深度控制系统设计	641
3.4 均衡控制系统设计	642
3.5 深度舵与联合舵产品	643
4 减摇控制	644
4.1 减摇控制原理	644
4.2 船舶减摇主要产品	645
5 避碰	646
5.1 船舶避碰简介	646
5.2 避碰系统工作原理	647
5.3 避碰系统产品	648
6 动力定位	649
6.1 动力定位系统原理	649
6.2 动力定位系统设计	650
6.3 动力定位系统典型产品	651
第 6 章 船舶安全监控系统	652
1 常用传感器	652
1.1 温度传感器	652
1.2 压力传感器	652
1.3 液位传感器	653
1.4 流量传感器	653
1.5 氧含量传感器	653
1.6 二氧化碳含量传感器	654
1.7 转速传感器	654
1.8 扭矩传感器	655
1.9 主机工况监视传感器	655
1.10 火警探测器	655
1.11 智能压力变送器	656
2 机舱集中监视与报警系统	657
2.1 机舱集中监视与报警系统的基本功能	657
2.2 SMS-12 型机舱监测与报警系统	658
2.3 DataChief C20 现场总线型机舱监控系统	661

3 船舶柴油机曲柄箱油雾浓度监视报警器	665
3.1 Mark5 型油雾浓度监视报警器	666
3.2 MD-9M/14M 型油雾浓度监视报警器	667
4 船舶火警监测系统	668
4.1 概述	668
4.2 系统组成	668
4.3 FF-3062-30 火警控制板的技术参数	668
4.4 典型定温式火警探测器 FD-6111	668
4.5 光电式感烟探测器 FD-8311	668
4.6 红外线火焰探测器 FD-5112	669
4.7 手动火灾报警器 FS-4011-2	669
参考文献	670

第 8 篇 船舶电磁防护技术

第 1 章 船舶磁性防护技术概述

1 船舶磁场	673
1.1 船舶磁场类型	673
1.2 磁场的表示和单位	673
2 地球磁场	673
2.1 地球磁场描述方法	673
2.2 地球磁场分布特征	674
2.3 地磁图	674
2.4 地磁模式组	675
3 船舶磁场分析方法	675
3.1 船体的铁磁性特点	675
3.2 船舶磁场类型	675
3.3 船舶磁场分析方法	677
4 船舶磁场防护技术	679
4.1 钢铁船舶磁性防护技术	679
4.2 特殊船舶磁性防护技术	681

第 2 章 船舶磁场测量与计算

1 船舶磁场测量方式	685
1.1 悬挂探头测量法	685
1.2 敞开式检测站	685
1.3 大平面磁探头阵列测量法	686
1.4 水下行车测量	686
1.5 移动式磁场检测站	686
1.6 磁场测量自动化系统	686
2 船舶磁场测量仪器	686
3 船舶磁场计算	688
3.1 指数衰减法	688
3.2 大平面换算法	688
3.3 谐波分析法	688
3.4 模拟换算法	689
3.5 磁偶极子阵列模拟换算法	689
3.6 边界元法	689

第 3 章 船舶固定磁场消磁

1 船舶固定磁场消磁方法	691
1.1 一般消磁法	691
1.2 一般消磁法中的几个问题	692
1.3 局部消磁法	693
1.4 综合消磁法	693
1.5 由消磁船对船舶实施综合消磁的步骤	693
1.6 在固定消磁站对船舶进行综合消磁的步骤	694
2 消磁电源	694
2.1 消磁主电源及其设备	694

2.2 消磁副电源及其设备	695	4.3 仪器功能	722
3 消磁场地	695	4.4 性能参数	723
3.1 消磁场地的选定	695	5 消磁控制设备误差测量	723
3.2 临时绕缆消磁场地的设施建设	695	5.1 仪器误差定义	723
3.3 固定消磁站低磁建筑物的磁性控制	695	5.2 过渡过程	724
第4章 船舶消磁绕组	696	第7章 船舶电场防护技术	725
1 消磁绕组分类	696	1 船舶电场分类	725
1.1 感应绕组	696	1.1 船舶腐蚀电场	725
1.2 固定绕组、附加绕组	698	1.2 船舶防腐电场	725
1.3 垂向感应轻型绕组	698	1.3 船舶漏电场	726
1.4 局部绕组	698	1.4 船舶感应电场	726
2 消磁绕组布置的基本原则	698	1.5 船舶摩擦电场	726
2.1 垂向绕组的布置	698	1.6 船舶尾流电场	727
2.2 纵向绕组的布置	698	2 船舶电场计算	727
2.3 横向绕组的布置	698	2.1 海水的电磁参数	727
3 消磁绕组磁设计	698	2.2 边界元方法计算船舶电场	728
3.1 磁性航区、标准测量深度及测量点	699	2.3 等效源方法计算船舶电场	729
3.2 消磁系统设计输入数据	699	3 船舶电场测量	732
3.3 消磁绕组磁场的设计	699	3.1 电场测量仪器	732
4 消磁绕组电设计	702	3.2 船舶水下电场测量实例	733
4.1 确定消磁电源类型及参数	702	3.3 电场测量实例结果分析	733
4.2 绕组电缆的选择	702	4 船舶电场防护	734
5 消磁绕组安匝调整	703	4.1 船舶电场防护原理	734
5.1 消磁绕组接线装置	703	4.2 电场防护装置	735
5.2 消磁绕组安匝调整方法	704	4.3 电场防护设计方法	736
第5章 船舶消磁电源	705	4.4 电场防护与防腐设备的配合	737
1 船舶消磁电源技术要求	705	参考文献	738
1.1 消磁电源分类	705	第9篇 船舶电磁兼容	739
1.2 消磁电源设计要求	705	第1章 船舶电磁环境效应	741
1.3 基本功能	705	1 概述	741
1.4 技术性能要求	706	1.1 电磁环境	741
2 旋转式消磁电源	706	1.2 典型电磁环境电平	741
2.1 类型	706	1.3 舰船电磁环境效应要求	743
2.2 控制方式	707	1.4 舰船电磁兼容发展趋势	746
2.3 电机扩大机的主要技术数据	707	2 电磁脉冲效应	746
2.4 电机扩大机组的连接方式、接口参数 及维护使用要求	710	2.1 几种典型电磁脉冲的特点	746
3 静止式消磁电源	710	2.2 电磁脉冲效应	755
3.1 静止式消磁电源的分类	710	3 射频电磁环境效应	758
3.2 晶闸管消磁电源	710	3.1 船舶射频电磁环境	758
3.3 脉宽调制式消磁电源	711	3.2 强电磁辐射源	758
3.4 应用现状	712	3.3 电磁辐射危害的确定	759
4 特种消磁电源	712	3.4 电磁危害的安全限值	762
4.1 多通道式消磁电源	712	3.5 射频辐射源的近远场计算	763
4.2 分布式消磁电源	713	3.6 电磁场数值计算方法概述	765
第6章 船舶消磁电流控制仪	714	4 电磁环境效应管理	766
1 船舶消磁控制设备类型	714	4.1 电磁环境效应管理要点	766
2 罗经式消磁电流控制仪	714	4.2 频率分配	767
3 磁强计式消磁电流控制仪器	714	4.3 电磁环境效应和频谱验证试验与评估	769
3.1 仪器组成	714	第2章 船舶电磁兼容性测量	772
3.2 仪器工作原理	714	1 概述	772
3.3 磁探头工作原理	717	2 电磁兼容测量设施及仪器	772
3.4 磁强计式消磁系统抗干扰调整	718	2.1 电磁兼容主要测量设施	772
4 地磁解算式消磁电流控制仪	721	2.2 电磁兼容测量设备	774
4.1 仪器组成	721	2.3 测量系统及测量软件	776
4.2 工作原理	722	2.4 电磁敏感度测量设备	777

2.5 敏感度测试系统及测量软件	778
3 设备、分系统电磁兼容性测量	778
3.1 军用船舶设备、分系统的电磁兼容性要求	778
3.2 测试方法	781
3.3 民用船舶设备电磁兼容性测试要求	790
4 系统电磁兼容性测量	792
4.1 引言	792
4.2 安装工艺检查测量	793
4.3 电磁辐射危害测量	795
4.4 电源特性测量	798
4.5 电磁环境测量	798
4.6 天线干扰耦合测量	799
4.7 互调干扰测量	800
4.8 设备间相互干扰试验	801
4.9 安全裕度试验	802
5 屏蔽效能测量	803
5.1 引言	803
5.2 低阻抗磁场屏蔽效能测量	803
5.3 高阻抗电场屏蔽效能测量	803
5.4 平面波场屏蔽效能测量	804
5.5 金属屏蔽舱室屏蔽效能的测量	805
5.6 标准机箱屏蔽效能的测试	806
5.7 吸波材料的反射率和介质参数测量	806
6 滤波器测量	808
6.1 电磁干扰滤波器安全性能参数的测量	808
6.2 电磁干扰滤波器插入损耗测量	809
第3章 船舶电磁兼容分析	812
1 电磁兼容分析的发展	812
1.1 电磁兼容分析原理	812
1.2 电磁兼容预测常用软件功能介绍	814
2 电磁骚扰源	815
2.1 电磁骚扰与电磁干扰	815
2.2 骚扰源的基本分类	815
2.3 自然骚扰源的特性和分析	815
2.4 人为骚扰源的分析	816
3 电磁干扰耦合途径	817
3.1 噪声干扰的途径	817
3.2 耦合路径的数学模型	818
4 敏感系统的电磁敏感性	826
4.1 常见的敏感设备及其电磁干扰敏感性 评定标准	826
4.2 电磁干扰敏感机理及敏感性能估算	826
4.3 电气系统的敏感性	828
5 系统电磁兼容性的基本分析方法	828
5.1 系统内电磁兼容性分析	828
5.2 系统间电磁干扰分析	829
第4章 船舶电磁兼容设计	831
1 元器件选用	831
1.1 电阻器	831
1.2 电容器	831
1.3 磁性元件	832
1.4 开关和继电器	833
1.5 连接器	834
1.6 电缆和光纤	834
1.7 模拟和逻辑器件	835
1.8 印制电路板	836

2 电力电子设备的设计	836
2.1 电力电子器件	836
2.2 直流电源设备	836
2.3 交流电源设备	836
2.4 电力电子设备的电磁兼容性	837
3 电磁干扰滤波器	838
3.1 电磁干扰滤波器的主要特性	838
3.2 电磁干扰滤波器的分类	838
3.3 电源线滤波器	839
3.4 信号线滤波器	840
3.5 专用滤波器	840
3.6 电磁干扰滤波器的正确选择和使用	841
4 电线和电缆的布局	841
4.1 线间电磁耦合现象	841
4.2 一般设计原则	842
4.3 船舶布线设计	843
5 屏蔽技术	844
5.1 电场屏蔽	844
5.2 磁场屏蔽	845
5.3 电磁屏蔽	846
5.4 电磁屏蔽设计导则	848
5.5 屏蔽材料	849
5.6 船舶屏蔽舱室	850
6 搭接与接地	850
6.1 搭接	850
6.2 接地技术	852
7 系统的电磁兼容性设计	853
7.1 系统电磁兼容设计的指导思想	853
7.2 兼容性设计的基本参数	854
7.3 系统电磁兼容性设计要求	854
7.4 系统电磁兼容性控制设计	855
7.5 系统兼容性设计的保证	857
参考文献	859

第10篇 船舶电气工艺

第1章 船舶电气设备安装工艺	863
1 概述	863
1.1 主题	863
1.2 说明	863
2 船舶电气设备安装的基本工艺要求	863
3 各类电气设备安装的附加工艺要求	863
3.1 电机	863
3.2 主配电板和应急配电板	863
3.3 控制设备及分配电设备	864
3.4 照明灯具和附具	864
3.5 强光灯、探照灯及航行信号灯	864
3.6 生活电器	864
3.7 船内通信、信号设备	865
4 电气设备安装阶段	865
4.1 大型设备安装阶段	865
4.2 普通舱室设备安装阶段	865
4.3 有热绝缘及封闭板的舱室设备安装阶段	865
4.4 专用工作舱室设备安装阶段	865
5 电气设备安装方法	866
5.1 安装前的准备工作	866
5.2 在舱壁上安装	866

5.3 在舱顶上安装	867	6.4 用电缆卡子紧固电缆的基本形式	878
5.4 落地安装	868	6.5 在复合岩棉板或硅酸钙板上紧固电缆的 基本形式	878
5.5 暗装	868	6.6 电缆紧固件的相邻距离要求	879
5.6 带减震器设备的安装	869	6.7 用扎带紧固电缆的工艺要求	879
5.7 设备紧固要求	870	7 电缆穿过甲板、舱壁和船体构件	879
6 蓄电池的安装	871	7.1 电缆穿过非水密金属舱壁和船体构件	879
6.1 安装要求	871	7.2 电缆穿过水密舱壁	879
6.2 安装方法	871	7.3 水密填料盒的基本形式	879
7 电气设备接线	871	7.4 电缆穿过甲板	880
7.1 接线的准备工作	871	7.5 电缆穿过防火隔堵	880
7.2 接线程序及操作要点	871	8 限制火焰沿成束电缆传播的措施	880
8 检验规则	873	8.1 电缆表面加涂防火涂料	880
第2章 船舶电缆敷设工艺	874	8.2 电缆束上设置挡火隔板	881
1 概述	874	9 电缆金属护套接地	881
1.1 主题	874	10 电缆贯通密封	883
1.2 说明	874	10.1 对电缆贯通密封工艺要求	883
2 电缆册编制	874	10.2 对填料盒密封性要求	883
2.1 干线电缆和分支电缆	874	10.3 对填料函的技术要求	883
2.2 干线电缆册编制	874	10.4 电缆贯通密封工艺方法	883
2.3 分支电缆册编制	874	11 检验规则	883
3 在船体构件和甲板上开孔与紧固件、 组装件及安装件的焊接	875	第3章 船舶电磁兼容工艺	884
3.1 开孔形状与大小	875	1 概述	884
3.2 在甲板纵桁、横梁的腹板上开孔	875	1.1 船舶电磁兼容工艺特点	884
3.3 在甲板上开孔	875	1.2 说明	884
3.4 禁止开孔的部位	875	2 工艺准备	884
3.5 紧固件、组装件及安装件的焊接	875	3 搭接和接地工艺	884
4 电缆拉敷	876	3.1 搭接	884
4.1 概述	876	3.2 搭接和接地工艺要求	885
4.2 电缆拉敷前的准备工作	876	3.3 搭接和接地工艺方法	886
4.3 电缆拉敷工艺方法	876	4 屏蔽工艺	890
4.4 电缆管内拉敷电缆的工艺要求	876	5 滤波工艺	891
5 电缆敷设	876	6 绝缘工艺	891
5.1 电缆敷设工艺要求	876	7 特殊电缆敷设防干扰工艺	891
5.2 消磁电缆敷设工艺要求	876	8 防干扰遮挡板和雷达吸波材料的施工	891
6 电缆紧固	877	9 防护强电磁场辐射的工艺措施	891
6.1 电缆紧固工艺要求	877	10 检验规则	891
6.2 扎带紧固电缆的基本形式	877	参考文献	892
6.3 紧钩紧固电缆的基本形式	877		



第1篇 概 论

主编单位：海军工程大学

上海电器科学研究所(集团)有限公司

主 编：马伟明 张晓锋 夏 立 吴质根 吴正国

编写人员：马伟明(海军工程大学)

张晓锋(海军工程大学)

夏 立(海军工程大学)

吴质根(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

吴正国(海军工程大学)

孔令黄(上海电器科学研究所(集团)有限公司)



第1章 船舶电气工程概述

船舶电气工程是关于船用电气设备和船舶电气与控制系统的设计建造理论、运行控制方法以及工程应用技术的专业学科,是电气科学与技术的重要组成部分。船舶电气工程涉及从设备到系统、从控制到运行、从顶层设计到安装工艺全面、系统的专门知识,同电气科学与技术的各个领域既有联系又有区别。船舶电气工程主要研究对象为船舶以及海洋结构物(如海上石油钻井平台等)上所有与电气有关的基础理论、工程技术与运用方法,在诸如电机、电能变换、电气自动化以及电力系统保护等技术领域与陆用电气系统联系紧密,而在船舶电力推进、综合船桥系统以及船舶电磁防护等方面具有自己鲜明的特色。

由于船舶电气系统所处环境和使命任务特殊,船舶电气系统与陆地电气系统相比具有以下特点:

(1) 船舶所处环境条件恶劣,对船用电气设备有特殊的要求。船舶长期处于江河湖海等各种水体中,船体及船用设备直接暴露在复杂的自然环境下。船舶电气设备需要长期经受如高热,高湿,低温,盐雾,霉菌,日光辐射等各种恶劣环境条件的考验,在风浪较大的水域中行驶时还需承受横、纵向的摇摆以及高、低频的振动和冲击。随着用电设备的增加,特别是电力电子设备比例的增大,船舶电磁环境也日益恶劣。军用船舶和舰艇所载电气设备更是容易受到各种武器的打击而损坏。为了提高船舶电气设备在恶劣的环境条件下工作的可靠性,确保其在运行期间内的工作能力,不论是电工器件的选型,电气设备的设计和安装,电力系统的构建,还是电气设备的使用,电力系统的控制,以及各电气设备和子系统的维护、保养,都应严格按照船用标准和规范进行。对影响船舶航行安全和船员生命安全的重要电气设备,还应采用多路供电、应急供电的方式,保证其供电连续性,提高船舶在航行中的生存能力。

(2) 船舶电力系统是最为典型的移动式独立电力系统。船舶电力系统中电能产生、分配、传输以及使用皆在船舶内进行和完成。船舶远离陆地,全部电能依靠自给,一旦出现故障导致设备失电,将无法从其他电源获得电能支持,因而船舶对电力系统可靠性要求很高。同时,其独立电力系统的本质决定了船舶电网不是无穷大电网,其容量有限,作为主要电源的发电机与诸多电气设备的功率等级相差不大,系统容易受到负荷波动的影响,因而保证船舶电气系统优良的电能品质难度更大。

(3) 船舶电气系统功率密度大。大量船舶电气设备集中在容积有限的船舶舱室空间内,势必要求船舶电气系统及电能产生、变换、使用的各类设备具有较高的功率密度,随着船舶电力推进、脉冲功率设备的进一步广泛使用,船舶用电负荷总容量将大幅增加,对功率密度的要求将越来越高。目前,大型船舶电力系统装机容量已经达到20~50MW,未来将有可能达到100~200MW。为保证人员安全,不可能大幅提高电气设备的电压等级,因而供电电流相对较大,由此导致的系统保护、体积容量限制、功率密度较高等问题面临更大压力。

(4) 船舶电气设备种类繁多,运行工况复杂。船舶各子

系统需要遂行各种功能,因此电气设备种类特别繁多,从交流负荷到直流负荷,从工频的照明设备到高频的通信设备,从大容量的电力推进系统到精密的导航仪器系统,这些不同种类、不同电制的电气设备集中在相对狭小的空间中,相互之间的电气、电磁影响相对陆地电气系统更加强烈,从而带来了较为严重的电磁兼容性问题。各类船用负荷运行中频繁起停,随机性很大,船舶电气系统工况复杂,起伏较大,变化规律难以预估,因而增加了能量管理的难度。

我国是一个造船大国,航运大国。据统计,2006年,中国船舶完工量达1452万载重吨,同比增长20%,占当年全球造船产量的近1/5,已稳居世界第三位;远洋船队拥有的船舶数量和载重吨已在世界航运大国中位列第四;外贸进出口90%以上的货物通过海洋运输实现。造船业与航运业已逐渐成为支撑我国国民经济和地区经济社会发展的支柱性产业。同时,进一步提高军用舰艇和船舶的现代化水平,建设一支强大的海军,是维护国家安全、促进社会主义建设与发展的迫切要求。电气系统是船舶的“血液系统”,是船舶赖以生存的基础,是船舶航行的前提,是船舶运用的基本特征。特别是随着全电力船舶概念的提出和船舶电力推进技术的发展,船舶电气系统已成为支撑船舶的主能源系统,其重要性日益突显。船舶电气工程领域科学技术水平的进步将极大地促进我国造船和航运行业的发展,进一步提高海军的综合作战能力。

作为一个专门化的应用领域,船舶电气工程涵盖的船用电气器件、船用电气设备和船舶电气系统均需满足船舶与海洋环境条件相应规范规定的要求,同时,必须遵循船舶电气有关电制、电气界面品质和电能质量标准要求的相应规定。

船用电机电器是船舶电气工程的基本单元和构成要素,按照船用环境条件及船舶电气电制、电气界面品质的规定和要求,船用电机电器有专门的设计、生产标准和专用的系列产品。船舶电机包括船舶用直流电机、同步电机、异步电机、中频发电机等。船舶电器主要包括船用断路器、控制器、继电器、船用变阻器、船用电缆、船用变压器以及船用灯具、电取暖器、电炊具、冷藏柜等日用电器。

船舶电站是产生并连续供应全船电能的设备,是船舶电力系统的核心部分。船舶电站由原动机、发电机和附属设备(组合成发电机组)及配电板组成,根据原动机类型不同,构成船舶电站的发电机组又分为柴油发电机组、汽轮发电机组及燃气轮机发电机组等;根据功能不同,船舶电站可以分为主电站、应急电站、停泊电站等。变流机组、交流静止电源以及直流静止电源等还构成船舶特种电源系统,以满足武器或导航等特殊设备的供电需求。此外,船用电池也是一种重要的船舶电源形式,它可以为船舶各类用电设备提供清洁、高效的能源。

船舶电力系统是船舶电站、船舶配电网络和船舶用电负载所组成的完整体系的总称。以规范规定的品质向全船电力负荷连续供电是对船舶电力系统的基本要求。船舶电力系统是船舶电气工程的关键和核心研究领域,内容涉及船舶电力网络、船舶电力系统保护、船舶电能质量分析与控制、船舶

电力系统能量管理及船舶电力系统分析与仿真等。

区别于传统的原动机直接驱动螺旋桨的机械传动方式,船舶电力推进是指由原动机拖动发电机产生电能,供给推进电动机,再由推进电动机驱动螺旋桨的间接传动方式。根据推进电动机的类型不同,可以分为交流电力推进和直流电力推进两种形式。其中,在水面船舶电力推进中交流推进占主导地位,潜艇电力推进中直流推进目前占主导地位。船舶电力推进研究内容涉及船舶推进电机、船舶电力推进装置、船舶电力推进的变流与调速、特种电力推进装置及船舶电力推进的监测与控制等几个方面。

船舶机械电气控制介绍一些主要的船舶电气拖动机械的工作原理及其使用方法,其使命是将电能转换成机械能,以实现船舶机械设备的操作电气化与自动化。主要包括船舶电气传动与控制、船舶甲板机械电气控制、船舶舱室机械电气控制、船舶特种机械电气控制以及电磁弹射装置等方面。

综合船桥系统是一种集成系统,是在综合导航系统基础上发展起来的一种海上自动航行系统。其研究内容包括船舶主机遥控、船舶机舱自动化、船舶导航与通信、船舶操纵与控制、船舶安全监控系统等方面。

船舶电场与船舶磁场是船舶的固有特征信号,是敌方探测设备和水中兵器用于探测和攻击的主要物理场。船舶电磁防护就是采取现代电磁方法和控制技术来控制船舶电场特性和磁场特性,将船舶电场与磁场消除或补偿到一定范围内,以提高船舶,主要是军用船舶在敌方电磁侦测情况下的生存能力。船舶磁场防护可分为船舶磁场防护技术、船舶消磁绕组、船舶消磁电源、船舶消磁控制等方面。船舶电场防护技术研究主要涉及船舶电场分类、船舶电场计算、船舶电场测量、船舶电场防护等方面。

处于船舶狭小空间的船舶电气设备将不可避免地受到其他电气设备的电磁干扰,同时,其电磁信号也会对其他电气设备产生电磁干扰。船舶电磁兼容旨在研究船舶电磁环境下如何保证各电气设备正常功能的实现,主要包括船舶电磁环境效应、船舶电磁兼容性测量、船舶电磁兼容分析、船舶电磁兼容设计等方面。

船舶电气工艺主要规定了船舶电气设备安装与船舶电缆敷设的基本原则和工艺要求,以及船舶电磁兼容措施的工艺要求与实施方法。

近年来我国船舶电气工程领域获得了很大的发展,技术水平及自主创新能力得到了很大提高。不断发展的外贸经济以及飞速增长的航运需求对我国船舶吨位、自动化水平以及高科技含量提出了更高的要求。而面临现代化战争的不断挑战,我国海军更加迫切地需要具有现代化作战能力的大型舰船,以提高我国海军综合作战实力。在这样的需求背景下,

船舶电气系统正伴随着电气技术、电子技术、控制技术、信息技术等相关技术领域的不断进步和发展,向着大型化、全自动化、智能化的方向发展,其发展趋势可以体现在以下几个方面:

(1) 船舶电气系统容量将不断增大,功率密度将不断增加。由于船舶用电负荷的不断增多,特别是电力推进负荷以及大容量脉冲负荷的出现,船舶电力系统总装机容量不断增加,已经出现了总容量几十兆瓦的船舶,而未来船舶综合电力系统总容量将达到上百兆瓦甚至几百兆瓦。与之对应的是船舶电机技术的不断进步,目前船舶发电机以及推进电动机单机最大容量已经迈入兆瓦级水平,未来还将出现单机容量达到几十兆瓦的大型船用发电机和大型推进电动机。由于船舶集成化发电技术的出现和不断完善,发电模块将高度集成,其体积、重量不会随容量的增加而显著增加,因此船舶电气系统功率密度将进一步增加。

(2) 船舶电气系统将出现新的电制,新的供、配电结构形式。随着电力电子变流技术的发展,未来船舶将更加自由的选择采用交流电制,还是直流电制或交、直流混合电制。由于电力电子变流装置容量的增大,船舶电力系统可以通过交流发电机整流实现直流供电方式,而不必担心因采用直流发电机而带来的系统质量、体积的增大,从而可以充分利用直流系统易于控制,电能传输效率高、品质好的优点。船舶电力系统也将随着负荷容量的增加,由原来的单电站、双电站供电形式发展为多电站复杂电网供电形式,如环形、网形等网络结构形式,以提高系统供电连续性。配电结构形式则将普遍采用区域配电的模式,以便于分区管理和维护。

(3) 船舶电气系统将采用新的控制与运行管理模式。随着船舶电气系统容量、规模以及复杂程度日益增加,传统的手动或半自动的运行管理方式已经不能满足需求。只有采用基于现代控制技术和信息技术的智能化管理模式,才能使船舶电气系统各个组成部分协调工作,充分发挥船舶电气化的优势,加快我国船舶现代化发展进程。智能化控制技术将广泛渗透到船舶电力系统运行控制、能量管理以及继电保护的过程之中,起到及时发现和排除故障,避免人为误操作,减少船员劳动强度,提高系统供电的连续性、可靠性和电能质量的重要作用。

同时应该看到,我国船舶电气系统的现代化水平与世界领先水平还有一定的距离:机电产品自给率不高,许多机电配件还依赖进口;军用船舶和舰艇的建造水平与世界海军强国相比还有不小的差距,与我国海洋大国的地位不符。因此,广泛深入地开展船舶电气系统各项领域的研究,促进我国船舶电气系统跨越式发展具有十分重大的经济、军事意义。

第2章 船舶综合电力系统概述

1 船舶综合电力系统的基本概念

1.1 综合电力系统的定义

综合电力系统(Integrated Power System, IPS)是指采用电力系统集成技术来实现船舶电能的产生、输送、变换、分配以及利用,以满足船舶推进、日用负载、大功率脉冲负载等负荷的需要。它将船舶发电与推进用电、船载设备用电集成在一个统一的系统内,从而实现发电、配电与电力推进用电及其他设备用电统一调度和集中控制。

1.2 综合电力系统的结构和功能

船舶综合电力系统的典型结构如图 1.2-1 所示。

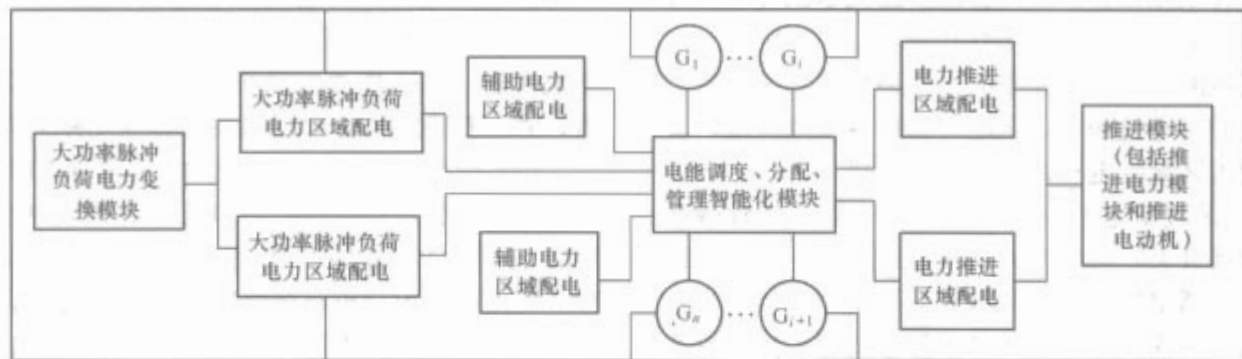


图 1.2-1 船舶综合电力系统典型示意图

2 综合电力系统的模块组成

综合电力系统装置根据功能可以划分为发电模块、配电模块、电力变换模块、推进模块、能量储存模块、电能控制模块以及日用负载模块。

2.1 发电模块

2.1.1 原动机

综合电力系统发电模块的原动机主要有柴油机、蒸汽轮机、燃气轮机、原子能反应堆装置和燃料电池五种形式。

(1) 柴油机。柴油机是目前船舶电力推进中最广泛采用的原动机,特别是中、小型船舶,采用柴油机较汽轮机更为经济。为了减轻质量和减小体积,电力推进船一般采用高、中速柴油发电机组。

(2) 蒸汽轮机。一般适用于大功率电力推进船以及船上本身需要大量蒸汽消耗的船舶。汽轮机可以用低级廉价的燃料,降低船舶营运的成本,汽轮机的缺点是需要蒸汽锅炉,使动力装置占用面积大,质量亦大。

(3) 燃气轮机。燃气轮机功率大、体积小,质量轻、结构简单、起动快,是电力推进船优先考虑的原动机。

(4) 原子能反应堆装置。把原子能反应堆中产生的热能,通过热交换器,加热蒸汽或惰性气体,然后通过汽轮机发电。作为电力推进船,它可以不需燃料储备而航行很长时间,因而特别适于破冰船、潜艇、远洋船等大中型船舶。

IPS 由发电模块、电能调度及智能管理模块、区域配电模块、电力推进模块、大功率脉冲负荷电力变换模块和环形供电网络等若干个模块组成。发电模块经环形电网向全船各区域配电系统供电;电能调度及智能管理模块对全船各区域配电系统实行电能分配及智能监控;区域配电模块将电力输送到各个电力区的负荷中心,然后再分配到用电设备,采用区域配电可使发电机的运行频率不受用电设备对频率的严格限制,实现发电机和整流设备成本、体积和质量的最佳化、集成化;电力推进模块用以实现船舶电力推进;大功率脉冲负荷电力变换模块为激光武器、电磁炮、电热化学炮、电磁弹射装置等大功率脉冲负载提供能量基础。每个模块都是高度集成化的完整系统。

(5) 燃料电池。燃料电池是直接或间接地使用燃料氧化自由能的化学电池,它与通常的电池不同,只要连续供应燃料就能连续产生电能。此外,它工作可靠,无噪音。并可根据需要,任意串、并联。这些优点,使燃料电池在电力推进的应用中具有广阔的发展远景。

2.1.2 发电机

发电机主要有电励磁同步发电机、永磁发电机、异步发电机和超导发电机四种形式。

电励磁同步发电机是船用发电机组的成熟产品,从数十千瓦到兆瓦级以上都有成型产品,在船舶电力系统中应用广泛。

永磁发电机和异步发电机具有功率密度高的突出优点,主要用作高速整流发电机,功率等级可达到数兆瓦级,但是开发难度大,技术尚未完全成熟。

超导发电机也具有功率密度高的突出优点,但是尚有很多关键技术尚未突破,技术比较复杂,可靠性没有保证,目前难以取得实际应用。

2.2 配电模块

配电方式分交流配电和直流配电两种,供电网络又可分为主电网、日用电网两部分,因此可组成多种配电模块。

对于日用电网而言,可以采用五种配电方式:传统干馈式配电,环形配电,交流区域配电,直流区域配电,交直流混合区域配电。

(1) 传统干馈线制配电系统技术成熟,应用广泛,但是这种配电方式电缆用量大,穿舱电缆多,供电生命力较低,供电连续性不高。

(2) 环形配电形式与干馈式配电相比,馈电通路增加,供电生命力有所提高,但是环形配电网络的保护比较复杂,横向保护与纵向保护协调较为困难,尤其是对于负载中心达数十个的大型船舶,日用电网采用环形网络时保护更加复杂,不能简单地通过断路器动作值的整定完成故障隔离和重构,需要像陆用大电网那样采用复杂的保护系统完成故障诊断、保护控制、保护策略决策及网络重构控制功能,这对综合监控系统和保护开关都提出了较高的要求。因此,一般主电网采用环形配电形式提高供电生命力,而负载中心很少采用环形配电形式,大多采用干馈线制,重要负载采用多路供电。

(3) 交流区域配电是区域配电的一种形式。区域式配电结构采用左右舷两条母线穿过水密舱,并综合考虑防火区域的划分,将船体分割成数个配电区域。一条主要母线位于吃水线以上,而另一条位于吃水线下,这就使得两条母线距离最大化,提高了安全性。另外区域式配电结构也可以降低电缆的质量和造价。采用区域配电技术后,船舶可以在建造各舱段时就独立进行电缆布置,在此分段连接到船的其他分段之前,将所有在本分段的设备连接好并供电。

(4) 直流区域配电是区域配电的另一种形式,可以进一步增强电力系统的供电生命力、供电可靠性和供电质量,直流区域配电与交流区域配电相比具有下列优势:

1) 采用直流区域配电系统后,可采用两组二极管接在逆变器前作为转换开关,转换时间很短,而交流电力系统的转换开关将引起的断电时间达到几秒,甚至是十几秒,另外各变换器模块均可实现故障诊断及自动保护功能,比机械式开关动作迅速,防止故障扩大,所以直流配电系统的供电连续性好。

2) 由于推进变频调速器和日用负载中的电力电子装置的应用,会产生大量谐波,而直流配电网络中的 AC-DC、DC-DC、DC-AC 变换器会隔离谐波,减小畸变率,因此直流配电可提高负载的供电品质。

3) 由于船舶日常负载除 50Hz、380V 供电外,还需要 400Hz、50Hz、220V、直流 24V 等供电要求,采用直流区域配电后可在本地供电区域内利用变换模块进行变换,取消了分布全船的特种电网,提高了供电生命力,降低了造价。

但是直流区域配电与交流区域配电相比也有不足之处:

1) 受直流转换开关分断容量的限制,两舷直流母线中的转换开关不能带载操作,不能分断短路故障电流,一旦发生电力电子器件短路性击穿,存在直流区域配电系统无法自动保护的隐患。

2) 由于主电网采用中压交流电制,需要采用变压器降压后进行 AC-DC 变换,直流区域配电系统中各模块的体积、质量也很大。

3) 直流区域配电技术复杂,大功率变电模块研制难度大。

(5) 交直流混合区域配电结合了交流区域配电和直流区域配电的优点,电动机类非敏感负载仍然采用低压交流区域式配电,计算机、导航设置、应急照明等敏感性的重要负载采用直流区域配电。

2.3 电力变换模块

依据交直流混合区域配电和直流区域配电两种结构,变

电模块也相应地分为两种不同类型:

1) 采用交直流混合区域配电时,变电模块主要包括 6600/390V 日用变压器、390V AC 至 320V DC 的 AC-DC 模块、320V DC 至 110V DC 或 24V DC 的 DC-DC 模块、320V DC 至 220V AC 的 DC-AC 模块、320V DC 至 400Hz AC 的 DC-AC 模块。

2) 采用直流配电方案时,变电模块主要包括 6600V AC 至 800V DC 的 AC-DC 模块、800V DC 至 600V DC 的 DC-DC 变压模块、600V DC 至 110V DC 或 24V DC 的 DC-DC 模块、600V DC 至 390V AC 的 DC-AC 模块、600V DC 至 400Hz AC 的 DC-AC 模块。

2.4 推进模块

推进模块由推进电动机、变频调速器和推进器三部分组成。

2.4.1 推进电机

按电机类型,推进电动机分为直流推进电动机、交流推进电动机、永磁推进电动机和超导推进电动机。

(1) 直流推进电动机。因其具有转速调节方便、过载能力强、起动和运行性能好等优点,在潜艇电力推进系统中至今仍占统治地位。为适应形势发展的需要,正不断改进设计,采用新技术、新结构、新工艺、新材料,以提高推进电动机性能。直流推进电动机有单枢单换向器、单枢双换向器、双枢双换向器、双枢四换向器等几种结构。

(2) 交流推进电动机。电力电子技术和控制技术的飞速发展,使得交流调速性能可以与直流调速相媲美、相竞争。交流电动机已有逐步替代直流电动机作为推进电动机的趋势。交流推进电动机有绕线式异步推进电动机、鼠笼式异步推进电动机、同步推进电动机等。

(3) 永磁推进电动机。伴随着永磁材料和交流调速的发展,永磁推进电动机以其明显的优势展示在世界海洋上。永磁推进电机在德国 212 潜艇、俄罗斯“阿莫尔”号潜艇上的成功应用以及美国、英国、法国等各国在实用化研究上的硕果累累,有力地证明了它是近中期首选的动力装置,是船舶直流推进电动机的更新换代产品。永磁推进电机按气隙磁通方向,可以分为径向磁通永磁电动机、轴向磁通永磁电动机和横向磁通永磁电动机。按电枢绕组反电动势波形,可分为正弦波永磁电动机和方波(梯形波)永磁电动机。

(4) 超导推进电动机。因为高温超导材料的发展,超导电动机引起世界各国的青睐,是中远期可提供高效、大功率动力的推进电动机。超导推进电动机有超导单极电动机、超导同步电动机、超导异极电动机(即超导换向器式直流电动机)、特种超导电动机等。其中超导单极电动机、超导同步电动机具有一定的研究基础,较为成熟。

在水面船舶电力推进中交流推进电动机占主导地位,目前是异步推进电动机、同步推进电动机和永磁推进电动机并存的局面。在潜艇电力推进中直流推进电动机目前占主导地位。

2.4.2 变频调速器

综合电力系统采用的变流器结构主要有以下几种:

(1) 交直变流器,控制对象为直流电动机。在船舶电力推进应用中,桥式全控晶闸管整流器给直流电动机供电,具有可控的电枢电压,实现直流推进电机的调速功能。

(2) 交-交循环变频器,控制对象为感应或者同步电动机,主要用于速度极低而扭矩极高的场合,例如破冰船等。但是这种变流器的功率密度较低,输出谐波大,导致较大的

振动和噪声。

(3) 同步变频器(又称电流源型逆变器或者负载换向逆变器),控制对象为同步电动机,主要用于同步电动机变频调速控制,其技术发展已经十分成熟。由于它主要采用晶闸管作为主开关器件,因此在电压、功率等级和经济性方面具有优势,所以很多采用电力推进的大型民船如油轮和客轮等都采用这种结构的变频器。它的主要缺点是功率密度不高,同样存在噪声和振动较大的问题。

(4) 电压源型脉宽调制变频器,控制对象为感应电动机、同步电动机或者永磁电机。该类变频器在功率密度、输出谐波、控制性能等方面比其他几种类型的变频器具有更多的优点,另外,它的控制对象也更加灵活,可以是感应电动机、同步电动机或者是永磁电动机。PWM变频器对电网电制和推进电动机的类型都有限制。如果采用交流电网,需要增加一套变压整流装置:因为电网是三相三线制,为了获得高品质的直流电源,一般采用6相12脉波整流或者12相24脉波整流,这就需要引入一套笨重的移相变压器,二极管整流装置和滤波装置也必不可少,对变频装置而言,这是采用交流电网的一个缺点。如果采用直流电网,则变频器的直流电源可以直接从电网获取,省却了移相变压器,整流装置可以集成到发电装置中,而发电系统也可以采用高速高功率密度集成发电技术,不但可以减小设备的质量、体积,也可以提高直流电源品质。对于其他舰用低压交流负载设备,可以采用额外的逆变电源供给,或者利用辅助低压交流机组供给。

2.4.3 推进器

推进器的种类有:常规轴系推进器、Z型推进器、吊舱式推进器、磁流体推进器。

(1) 常规轴系电力推进。常规轴系电力推进是由推进电动机通过轴系直接带动螺旋桨推动船舶前进,与常规机械推进的传动设备基本相同。

(2) Z型电力推进装置。Z型电力推进装置是由两对伞型齿轮传动带动螺旋桨的全回转装置。推进电动机在船体内,主要应用于航速低于15kN的拖轮及海上作业船,由于受机械强度和伞型齿轮加工难度的限制,在该装置作为主推进时,一般单机最大功率小于4000kW。

(3) 吊舱式推进系统。吊舱式推进系统是近年来发展的一种非常先进的新型电力推进系统。其主要工作原理是:将用于直接驱动螺旋桨的大功率电动机安装在船体下面的一个流线型的吊舱里,吊舱可随垂直转动轴作360°水平旋转,以达到最佳的灵活性。

吊舱里的推进电动机采用空冷式低速同步电动机。低速电动机直接与定距螺旋桨连接,去掉了传统的传动齿轮。吊舱、推进电机以及螺旋桨连成一个整体置于船底部的水中,其结构如图1.2-2所示。

同步电动机采用同步变频器进行速度控制。对于低功率范围或特殊要求,可采用PWM变频器调速。螺旋桨方位角由电动—液压装置操纵,二至四台液压电动机驱动钢质齿轮达到控制螺旋桨旋转的目的。液压电动机的数量取决于对操纵能力和冗余程度的要求。调节推进电动机的转速和螺旋桨的方位角即可实现船舶前进、倒车、转向、调速、制动等各种航行工况,使船舶的灵活性和机动性处于最佳状态。

吊舱式推进系统除具有一般电力推进的特点外,还具有更显著的优点。

- 1) 效率高。
- 2) 控制灵活,机动性能好。

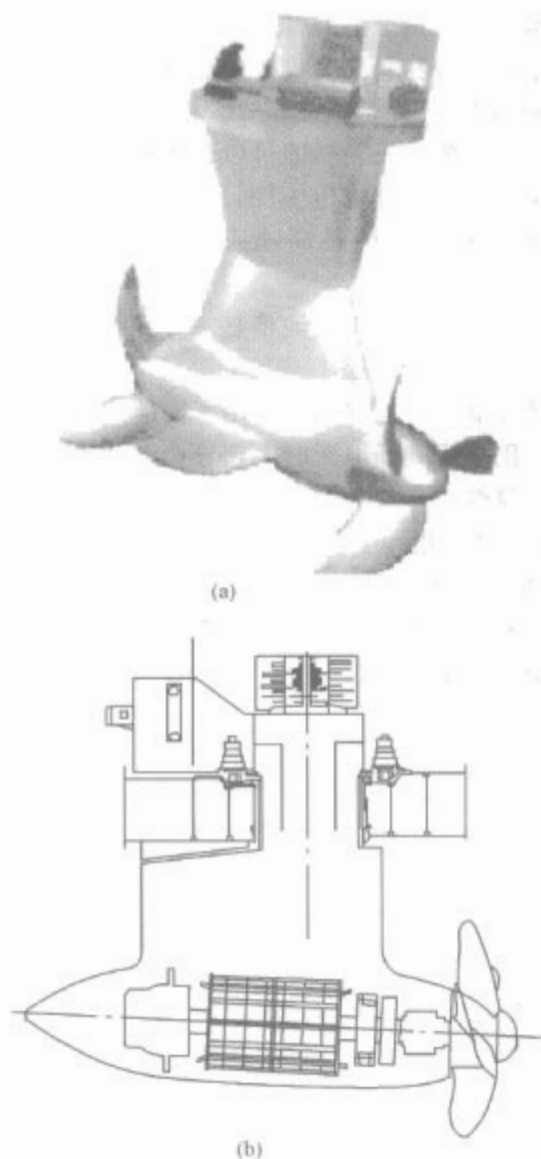


图 1.2-2 吊舱式推进系统
(a) 外形图; (b) 结构图

- 3) 倒车迅速, 应急制动距离短, 动态响应快。
- 4) 噪声更低, 振动更小。

(4) 磁流体推进。是一种无噪声的新概念推进方式,它是根据弗莱明(Fleming)左手定则,利用海水作为导体,在强磁场作用下产生电磁力的基本原理实现的。传统的船舶螺旋桨推进器在水下高速转动时会产生空泡现象,大大降低了推进装置的效率,限制了船舶行进速度的提高,同时,由于拖动机械的振动、磨损以及噪声使船舶的隐蔽性大为降低。而电磁流体直线推进装置没有传统的旋转机械装置,几乎可以做到无噪声推进,速度也将大为提高。

磁流体推进器可以分为外磁式磁流体推进器和内磁式磁流体推进器两种。外磁式磁流体推进器的磁场和电场均在推进器的外部,故又称为外部式。内磁式磁流体推进器的磁场和电场在推进装置的内部,故又称为内部式。

2.5 日用负载模块

采用交流配电式综合全电力系统时,日用负载模块电气接口与非电力推进船舶相同。

采用直流配电式综合全电力系统时,许多需要直流电的日用负载模块可直接通过日用变电模块获取直流电,可省去日用负载内部的AC-DC环节,需要400Hz中频电源的负载也可直接进行DC-AC变换,不必经过50Hz交流电环节,省去中频发电机组。

2.6 储能模块

储能模块主要包括六种形式。

(1) 蓄电池。铅酸蓄电池技术已相当成熟,可满足船舶的应用需求,但存在功率密度小、脉冲功率不大、充电缓慢等诸多不利因素。

(2) 飞轮储能。飞轮储能可以分为两种类型:一种是脉冲发电机组,属于脉冲发电模块,主要用于飞机电磁弹射器或高能武器;另外一种为高速飞轮储能,主要用作应急电源。

(3) 燃料电池。燃料电池将是一种理想的储能装置,可实现分布式的不间断电源。

(4) 超导储能。超导储能可用于高能武器,也可用于不间断电源,用于不间断电源时,超导储能装置必须进一步提高容量、可靠性。

(5) 电容储能。电容储能还处在基础研究中,估计2020年前难以达到实用化。

(6) 压缩气体或蒸汽。蒸汽储能装置,性能劣于电磁弹射器,体积、质量巨大。

2.7 电能控制模块

电能控制由综合平台管理系统(IPMS)实现,综合平台管理系统源自于工业生产中广泛应用的计算机集成制造系统(CIM),它集计算机、通信、网络、自动控制等技术于一体,对船舶平台部分的主要系统及设备,用网络把它们连接在一起,为船舶的操作管理人员,提供了一个信息采集、显示的自动路径和对这些系统及设备实现自动监控和远距离操纵及智能化管理的优良平台。

综合平台管理系统可以实现对综合电力系统的监测、报警、控制和管理。

综合平台管理系统一般包括:主推进监控系统、电站及电能管理系统、辅机监控系统、损管系统、三防系统、综合舰桥系统、综合状态评估系统、实船在线训练系统、全船保障系统、电视监视系统等分系统。



第3章 船舶电气设备的使用条件

1 概述

船舶电气(含电子)设备必须在船舶这一特定的环境条件下正确无误地工作,从而确保船舶的安全航行、正常作业以及在船人员的人身安全和正常生活。因此,熟悉船上存在的环境条件就成了船舶电气工程人员的必修课,对船舶存在的各种环境条件及其对设备的考核要求的研究,就成了船舶电气工程的一项重要课题。在世界电工标准领域的权威机构——国际电工委员会(IEC)有专门的专业分委会(TC75),专门研究与电工技术有关的各种环境条件要求及其考核方法,并推出了一大批相关标准,其中包括船舶环境条件。

船舶上存在着气候环境条件、生物环境条件、化学活性物质条件、机械活性物质条件和机械环境条件。此外，现在还将电磁环境列入其中，这当然也是客观存在着的。不同类型船舶、在不同航区航行以及设备的安装方式或位置不同，电气设备所承受的环境条件当然是不同的，因此这些环境条件就有不同的等级。以下就分别介绍上列各类环境条件参数

及其应用指南、船级社的有关要求以及船舶电气设备所应进行的环境条件的试验参数和所采用的试验方法标准。

对以上所提及的电磁环境详见本卷第9篇的专题论述,这里就不重复了。

舰船是用于水上作战的特殊船舶,其电气设备的使用条件,尤其是对机械环境条件要求较高。对舰船电气设备的环境条件及其试验等有关要求,本章仅列出其适用的有关 GJB 标准号作为索引,不涉及具体内容。

2 环境条件参数及其应用指南

表 1.3-1~表 1.3-4 给出了各类环境条件参数,并按电气设备的安装部位等,给出了这些参数的应用指南。给出的这些参数是考虑影响设备结构完整性和功能特性的结果,而不包括偶然发生的事故因素在内。但对船舶营运安全性至关重要的产品,是应将偶然发生的事故的可能性考虑在内。

在这些表中：“一般”所指的是最低要求；“×”表示适用的参数。

表 1.3-1

气候环境条件参数及其应用指南

[illegible]

续表

[illegible]

续表

环境条件参数 安 装 处 所	温 度												湿度⑦ 高相对湿度,不伴 随急剧的温度变化 (%) (℃)			伴有急剧的 温度变化,在高相 对湿度下的		低相 对湿 度 (%) (℃)	周围 介质的 运动		降雨 量⑤⑥ (mm/min)	辐 射				除雨以 外其他 来源的 水⑧ (m/s)			潮 湿				
	低 温		高 温				温度的变化																										
	空气① (℃)		水②	空气③ (℃)		表面④ (℃)	水 (℃)		逐渐变化 空气/空气①⑤ (℃) (℃/min)		空气 /水 (℃)																						
	+5	-25		-40	冰点		40	55	70	70		25	30	35	-25/+20 1	-25/+40 3	40/5	95 30	95 35	95 45	95 -25/+35	60 +70/+15	10 30	30	50	6	15	700	1120	600	1200	0.3	3
4.3 在高 水温区域, 例如阿拉伯 的海湾工作				×																													

- ① 在机舱中的许多产品要求在预热后方进行工作,对这类产品,工作的低温应定为+5℃,而其温度的梯度变化仅适用于非工作状态。
- ② 由于盐或其他物质的存在,水的冰点可能低于0℃。
- ③ 对于安装在控制屏或柜内的控制和测量仪表设备,应考虑到其中部件散发热量而引起的升温。
- ④ 产品可能与之连接的发热部件的表面,可能存在更高的表面温度,对此应予考虑。
- ⑤ 温度变化既可以是温度上升也可以是温度下降。
- ⑥ 应该注意的是,在某一处所,在产品的内部或外部可能会结冰,从而可能导致运动部件的失灵。这种结冰可以是冷表面的冷凝和受冻引起,或是由空气速度和相对湿度共同作用引起(与产品外形有关),或是由于雨水的过冷引起。
- ⑦ 温度的急剧变化是指温度的快速急剧下降,含水量数值适用于温度下降到露点的各种温度,在各种较低温度下,其相对湿度假定为100%。
- ⑧ 雨滴的大小同样是重要的,特别是在有大风共同作用时。
- ⑨ 较低的数值适用于未经过特别处理以减少热传导的玻璃。
- ⑩ 该速度不应理解为单位时间内在一个地面上收集到的水量。
- ⑪ 通风、加热或空调系统的故障可改变规定的环境状态。
- ⑫ 对于锅炉和发动机等,根据它们的类型和确切位置,可能存在更高的温度。这种情况不包含在这里,对此应作考虑。
- ⑬ 过渡状态。
- ⑭ 通常,船舶不在气温-40℃以下航行。然而,当船舶拆卸修理,搁置无保护时,温度可降至-40℃以下,有时可达到-55℃。

表 1.3-2 化学和机械活性物质条件参数及其应用指南

环境条件参数 安 装 处 所②	化学活性物质①						机械活性物质					
	空气中的 盐雾 (mg/m³)		其他各 分组③			水中④ 海盐⑤ (kg/m³)	空气中的 沙 (g/m³)		灰尘沉积量 (mg/m²h)	烟灰沉积	油滴油雾 (mg/m³)	
	3	10	I	II	III	30	0.1	10	3		3	20
1 完全不受天气影响的场所												
1.1 一般			×									
1.2 无防盐雾	×		×									
1.3 暴露于微粒、灰尘的场所			×				×		×			
1.4 机器处所												
(1) 一般			×								×	
(2) 柴油机附近			×									×
2 不完全不受天气影响的场所												
2.1 限于在内陆水路区域运行												
(1) 一般			×									
(2) 暴露于工矿企业的排出物中					×							
2.2 在全世界运行												
(1) 一般		×	×			×						
(2) 暴露于附近的工矿企业的排放物中		×			×	×						
(3) 靠近沙漠的区域		×	×			×		×				
2.3 暴露于发动机排气中				×		×						
2.4 暴露于锅炉排烟中				×		×				×		

- ① 由于运行的范围和持续时间,以及所装载的货物,可能出现不同于所列的那些参数和物质。
- ② 列出的参数可以仅是周期性的,随运行的范围而定。
- ③ 在空气和气体中的物质:

成 分	单 位	I 组	II 组	III 组
二氧化硫	mg/m³	0.1	1.0	1.0
硫化氢	mg/m³	0.01	0.01	0.5
氧化氮(用二氧化氮的当量值表示)	mg/m³	0.1	1.0	1.0
臭氧	mg/m³	0.01	0.01	0.1
氢氯化物	mg/m³	0.1	0.1	0.5
氢氟化物	mg/m³	0.003	0.003	0.03
氨	mg/m³	0.3	0.3	3.0

- ④ 除了海盐以外,水中其他物质这里不包括,因为已考虑到它们在电气设备上的影响很小。
- ⑤ 在某些情况下,低浓度的海盐可能比较高浓度的海盐产生更严重的腐蚀。

表 1.3-3 机械环境条件参数及其应用指南

环境条件参数 安 装 处 所	稳态振动正弦 ^{①②③} (mm) (Hz)			非稳态振动 (含冲击) (m/s ²)					倾斜和摇摆 ^④					稳态轴向加速度 (m/s ²)		
	(m/s ²) (Hz)								稳态倾斜角度 +或- ^⑤		动态摇摆角度 +或- (Hz)					
	1.5 2~13	1.5 2~28	1.5 2~28	I		II		III	x 15	y ^⑥ 10	x 22.5 0.14	y 10 0.2	z 4 0.05	x 5	y 6	z ^⑦ 10
	10 13~100	20 28~200	50 28~200	50	100	100	300	500								
1. 超过大约 500 总吨船上的 场所																
1.1 一般	×			×		×			×	×	×	×	×	×	×	×
1.2 船部	×				×		×		×	×	×	×	×	×	×	×
1.3 穿越冰区的船上 ^⑧	×				×		×		×	×	×	×	×	×	×	×
1.4 大约为 10 000 总吨及 以下 船的尾部包括舵机室		×		×		×			×	×	×	×	×	×	×	×
1.5 起货系统上,如集装箱 导轨,起重机 ^⑨		×			×		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
1.6 往复机上 ^⑩			×	×		×			×	×	×	×	×	×	×	×

- ① 一般用主机所产生的振动,主要是低频分量突出的正弦振动。然而在破冰船上也会出现频率高至 2000Hz,强度高至 50m/s² 的高频振动。船体或螺旋桨和水相互作用所产生的力也会引起随机振动。但其振级一般较低,故在此不予考虑。
- ② 位移和加速度值是振幅值。
- ③ 在小船上,依赖它们的设计和推进,可产生比规定高的振动。
- ④ 相对于船体的三个正交坐标轴为:
x 轴——沿船的首尾方向。
y 轴——沿船的横向。
z 轴——沿船的垂向。
- ⑤ 对于长/宽比小于或等于 3 的船,例如近海移动平台,是把 y 轴的稳态值看作与 x 轴的相同。
- ⑥ 对船长大于 150m 的船,严酷度减至 5°。
- ⑦ 长度长于大约 150m 的船,严酷度可减至 6m/s²。
- ⑧ 凡直接安装在船体上的产品,冲击级可视当地经验,高于表上所列数值。
- ⑨ 在桅杆上,低频范围内的振幅可能超过所示值。
- ⑩ 可能存在很特殊的情况,如安装在减振器上的柴油发电机的排气管。此数值可向有关的柴油机制造厂索取。

表 1.3-4 生物环境条件参数及其应用指南

安 装 部 位	空气中的植物和动物	
	霉菌,真菌	啮齿动物和其他动物
1. 运行在低生物危险的地区或对霉菌、真菌等生长的和啮齿动物及其他动物危害有防护的场所	可忽略	可忽略
2. 运行在霉菌、真菌等生长的高危险地区	×	
3. 运行在啮齿动物及其他动物高危害地区		×

注 安装在船体外壳水下部分产品的将受到水中植物和动物(生长藻类,海洋动物)的侵蚀。

3 船级社对船舶环境条件的要求

自 20 世纪 80 年代至本世纪初,在国际船级社协会(IACS)的努力下,世界上几个主要船级社,例如英国 LR、德国 GL、挪威 DNV、美国 ABS、法国 BV、俄国 RS、日本 NK 和中国 CCS 等船级社,对船用设备的环境条件方面有了基本统一的要求。这些要求包括:

3.1 气候环境条件

(1) 对环境空气温度和初级冷却水温度的基本要求如表 1.3-5 所示,但适用于电子设备的环境空气温度的上限为 55℃。

表 1.3-5 对环境空气温度和初级冷却水温度的基本要求

介 质	部 位	温 度 (℃)	
		无 限 航 区	除热带海区以外的有限航区、内河水域
空 气	围蔽处所内	0~45	0~40
	温度超过 45℃(或 40℃)或低于 0℃的处所内	按这些处所的温度	按这些处所的温度
	开敞甲板	-25~45	-25~40
水		32	25

此外,适用于自动化设备的环境空气温度如表 1.3-6 所示。

表 1.3-6 适用于自动化设备的环境空气温度

安 装 位 置	温 度 (°C)
一般围蔽处所和有空调的围蔽处所 ^①	+5~+55
有散热设备且无空调的围蔽处所	+5~+70
开敞甲板、无保温措施的甲板室	-25~+70

① 符合以下 (3) 规定的“受控环境”除外。

显而易见,这里对环境空气温度的上限要求较高,这与自动化设备的重要性,如其发生故障所产生后果的严重性,以及其对温度的敏感性有关。

(2) 潮湿空气,其中适用于自动化设备的相对湿度如表 1.3-7 所示。

表 1.3-7 适用于自动化设备的相对湿度

温 度 (°C)	相 对 湿 度 (%)
≤45	95±3
>45	70±3

(3) 当电气设备安装在环境空气温度受到控制的处所(简称“受控环境”)时,适用于电气设备的最高环境空气温度可以由适用的温度降低至不低于规定的温度,其条件是:

1) 该设备是非应急设备。

2) 至少有 2 套制冷单元对该处所进行温度控制,在其中 1 套制冷单元失效时,其余单元能满意地保持其设计温度。

3) 该设备开始时应能在适用的环境空气温度条件下处于安全工作状态,直至达到较低环境空气温度时为止。冷却设备的环境空气温度应为适用的温度。

4) 在连续有人的控制站内设有听觉和视觉报警,以指示制冷单元的任何故障。

5) 有关电缆的载流量,应以其整个长度上所遭遇到的最高环境空气温度为准确定。

3.2 化学和机械活性物质条件

空气中有盐雾和机器处所空气中有油雾存在。此外,由于船上所载运的货物,特别是在与货物作业有关的区域,空气中存在着由货物散发出的气体或者粉尘。例如油船空气中的石油气、运煤船空气中的煤粉等。

3.3 机械环境条件

(1) 倾斜和摇摆如表 1.3-8 所示。

表 1.3-8 倾斜和摇摆

设 备 组 件	倾斜角 (°) ^{①②}			
	横 向		纵 向	
	横倾	横摇	纵倾	纵摇
应急电气设备、开关设备、 电器及电子设备	22.5	22.5	10	10
上列以外的设备、组件	15	22.5	5	7.5

① 可能同时发生横向和纵向倾斜。

② 装运液化气体和化学品的船舶,其应急电源还应在船舶进水以致最终横倾达 30°的极限状态下能保持供电。

(2) 船舶正常营运中所产生的振动和冲击。对自动化设备的振动试验,船级社规范一般都提出了具体要求,如表 1.3-9 所示。

表 1.3-9 对自动化设备的振动试验要求

安 装 位 置	频 率 (Hz)	振 幅 (mm)	加 速 度 (m/s ²)
一般振动条件	2~13.2	±1.0	—
	13.2~100	—	±6.9 (0.7g)
剧烈振动条件(如柴油机、空压机及其他类似环境)	2~25	±1.6	—
	25~100	—	±39 (4.0g)
很特殊的振动条件,例如柴油机(特别是中高速柴油机)的排气管上	40~2000Hz, 加 速 度 ± 98m/s ² (10.0g); 温度为 600°C		

3.4 生物环境条件

空气中有霉菌存在。

4 船舶电气设备的环境条件试验

4.1 环境条件试验

以上介绍了对船舶电气设备所应承受的各种环境条件的要求,接下来就是如何确认其符合这些要求呢?那就是需进行相应的环境条件试验进行考核。对此在各项船用电气设备标准中都有明确规定,这些是必不可少的型式试验项目。各船级社对此也十分关心,都把这些试验视作重要的型式认可试验项目。对船舶电气设备,很多船级社都有一专门的型式认可试验技术要求。

下面主要介绍中国船级社(CCS)的有关要求。

4.2 各种电气、电子设备环境条件试验项目

4.2.1 环境条件分类

环境条件分类如表 1.3-10 所示。

表 1.3-10 环境条件分类

类 型	描 述	试验温度范围 (°C)
A	受控环境 ^①	按制造厂的规定
B	有一般温度、高湿和振动的围蔽处所	+5~+55
C	有高湿、振动和来自其他设备产生的热量的围蔽处所	+5~+70
D	剧烈振动环境(例如安装在往复式机械上)	+5~+55
E	开敞甲板上	-25°C~+70

① 使用空调设备并经本社同意的处所。

此外,位于低于+5°C而非环境类型 E 的寒冷处所内的设备,应按其所遇到的实际温度进行试验。

4.2.2 各类环境条件中设备的环境条件型式认可试验

各类环境条件中设备的环境条件型式认可试验如表 1.3-11 所示。

表 1.3-11 各类环境条件中设备的环境条件型式认可试验

试 验	环 境 类 型				
	A	B	C	D	E
倾斜和摇摆试验 ^①	×	×	×	×	×
振动试验	×	×	×	×	×

续表

试 验	环 境 类 型				
	A	B	C	D	E
高温试验	—	×	×	×	×
低温试验	—	×	×	×	×
交变湿热试验	—	×	×	×	×
恒定湿热试验	×	—	—	—	—
盐雾试验 Kb	—	—	—	—	×
盐雾试验 Ka ^②	—	—	—	—	×
长霉试验	船电标准要求项目（船级社作抽试）				

表中：“×”表示应做项目；“—”表示不适用，下同。
① 无运动部件和自由液面的设备，不需做倾斜和摇摆试验。
② 除设备标准另有规定者外，开敞甲板上的电机、变压器可做金属另部件的盐雾试验 Ka。

4.2.3 不同类型设备的环境条件型式认可试验

不同类型设备的环境条件型式认可试验如表 1.3-12 和表 1.3-13 所示。

表 1.3-12 除航行和无线电通信设备以外设备环境条件型式认可试验

设备类型 试验项目	电机、 变压器	电器及其成套 设备、仪表	自动化设备、 内部通信设备、 计算机和其 他电子设备
倾斜和摇摆试验 ^①	×	×	×
振动试验	×(仅微电机)	×	×
高温试验	—	—	×
低温试验	—	—	×
交变湿热试验	×	×	×
恒定湿热试验 ^②	×	×	×
盐雾试验 Kb	—	× ^③	×

表 1.3-14 电机、变压器、仪表电器及其成套设备试验参数

试 验 项 目	试 验 参 数	试验方法标准号
倾斜和摇摆试验	(1) 前、后、左、右 4 个方向各倾斜 22.5° ^{①②} ；每一位置的试验时间应能充分评估设备的特性，一般应不少于 15min (2) 前后、左右两个水平轴向摇摆 22.5° ^② ，一个位置转到另一位置的时间为 10s，试验持续时间为 15min	—
振动试验	试验参数如表 1.3-9 所示。有共振检查和耐振试验两项试验，如无明显共振点，则应在 30Hz 下作 90min 耐振试验	GB/T 2423.10 试验 Fc； 振动（正弦）
交变湿热试验	电机、变压器：55℃，6 周期（6d） 仪表、电器及其成套设备：55℃，2 周期（2d）	GB/T 2423.4 试验 d
恒定湿热试验	温度：(40±2)℃；相对湿度：90%~95%；持续时间：96h	GB/T 2423.3 试验 Ca
盐雾试验 Ka	试验溶液：质量分类为 5%±1% 的氯化钠（化学纯以上）溶液 试验温度：(35±2)℃ 试验持续时间：按不同底金属和不同镀层为：24~96h	GB/T 2423.17 试验 Ka
盐雾试验 Kb	试验溶液：质量百分比浓度为 5%±1% 的氯化钠（化学纯以上）溶液 相对湿度：90%~95% 温度：(40±2)℃ 试验周期：4 个喷雾周期。每个周期连续喷雾时间 2h，7 天湿热贮存期	GB/T 2423.18 试验 Kb
长霉试验	试验菌种按 GB/T 2423.16 规定 试验持续时间：28d	GB/T 2423.16 试验 Jb

① 在液化气体船和危险化学品船上，当船舶最大横倾达 30°时，应急电源仍能保持工作。
② 对于在实际情况下不会出现四个方向 22.5°倾斜的设备，例如发电机等，可根据实际情况确定。

续表

设备类型 试验项目	电机、 变压器	电器及其成套 设备、仪表	自动化设备、 内部通信设备、 计算机和其 他电子设备
盐雾试验 Ka	×	—	—
长霉试验	船电标准要求（船级社作抽试）项目		

- ① 无运动部件和自由液面的设备，不需做倾斜和摇摆试验。
② 仅适用于安装在 A 类环境中的设备。
③ 除设备标准另有规定者外，开敞甲板上的这些设备原则上应做盐雾试验 Kb。

表 1.3-13 航行和无线电通信设备环境条件型式认可试验

设备类型 试验项目	可携设备	室内设备	室外设备	潜水设备 ^①
高温试验	×	×	×	×
湿热试验	×	×	×	—
低温试验 ^②	×	×	×	—
热冲击试验	×	—	—	—
振动试验	×	×	×	×
雨和喷水试验	—	—	×	—
潜水试验 1	—	—	—	×
潜水试验 2	×	—	—	—
短时浸水试验	×	—	—	—
太阳辐射试验 ^③	×	—	—	—
耐油试验 ^③	×	—	—	—
盐雾（腐蚀）试验 ^③	×	×	×	×

- ① 包括连续接触海水的设备。
② 可携航行和无线电通信设备还应做 -30℃±3℃ 的低温储存试验。
③ 对太阳辐射、耐油和盐雾（腐蚀）3 项试验，如果制造厂能提供设备中使用的部件、材料及其最后的加工是满足试验要求的证明，则可免做这些试验。

4.3 各种电气、电子设备环境条件试验的试验参数和试验方法标准

(1) 电机、变压器、仪表、电器及其成套设备试验参数如表 1.3-14 所示。

(2) 自动化设备、内部通信设备、计算机和其他电子设备试验参数如表 1.3-15 所示。

表 1.3-15 自动化设备、内部通信设备、计算机和其他电子设备试验参数

试 验 项 目	试 验 参 数	试验方法标准号
倾斜和摇摆试验	(1) 前、后、左、右 4 个方向各倾斜 22.5° ；每一位置的试验时间应能充分评估设备的特性，一般应不少于 15min (2) 前后、左右两个水平轴向摇摆 22.5° ，一个位置转到另一位置的时间为 10s，试验持续时间为 15min	—
振动试验	试验参数如表 1.3-9 所示。有共振检查和耐振试验两项试验，如无明显共振点，则应在 30Hz 下作 90min 耐振试验	GB/T 2423.10 试验 Fc； 振动（正弦）
高温试验	B 和 D 类环境中的设备：试验温度 $(55\pm 2)^{\circ}\text{C}$ /持续时间 16h C 类和 E 类环境中的设备：试验温度 $(70\pm 2)^{\circ}\text{C}$ /持续时间 2h	GB/T 2423.2 试验 B
低温试验	试验温度： $(5\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ；或 $(-25\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ；或设备所在处所的实际温度（仅适用于位于低于 $+5^{\circ}\text{C}$ 而非环境类型 E 的寒冷处所内的设备） 持续时间：2h	GB/T 2423.1 试验 A
交变湿热试验	55°C ，2 周期（2d）	GB/T 2423.4 试验 d
恒定湿热试验	温度： $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度：90%~95%；持续时间：96h	GB/T 2423.3 试验 Ca
盐雾试验 Kb	试验溶液：质量分数为 $5\%\pm 1\%$ 的氯化钠（化学纯以上）溶液 相对湿度：90%~95% 温度： $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 试验周期：4 个喷雾周期。每个周期连续喷雾时间 2h，7 天湿热贮存期	GB/T 2423.18 试验 Kb
长霉试验	试验菌种按 GB/T 2423.16 规定 试验持续时间：28d	GB/T 2423.16 试验 Jb

(3) 航行和无线电通信设备试验参数如表 1.3-16 所示。

表 1.3-16 航行和无线电通信设备试验参数

试 验 项 目	试 验 参 数	试验方法标准号
高温试验	试验温度 $(55\pm 2)^{\circ}\text{C}$ /持续时间 16h；除室内设备以外，还需做 $(70\pm 2)^{\circ}\text{C}$ /持续时间 16h 的高温贮存试验	GB/T 2423.2 试验 B
湿热试验	温度： $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度： $93\%\pm 2\%$ ；持续时间：1d	GB/T 2423.3 试验 Ca
低温试验②	可携设备： $(-20\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 加上 $(-30\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 低温贮存试验 室内设备： $(-15\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 室外设备： $(-25\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 持续时间均为 16h	GB/T 2423.1 试验 A
热冲击试验	将受试设备放在 $(70\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 的大气环境中，历时 1h。然后将其浸入温度为 $(25\pm 3)^{\circ}\text{C}$ ，深度为 $(100\pm 5)\text{mm}$ 的水中。该深度为自受试设备的最高点量至水表面	
振动试验	试验参数如表 1.3-9 所列。有共振检查和耐振试验两项试验，如无明显共振点，则应在 30Hz 下作 90min 耐振试验	GB/T 2423.10 试验 Fc； 振动（正弦）
雨和喷水试验	喷嘴内径：12.5mm 水流量： $100\times(1\pm 5\%) \text{ L/min}$ 水压力：按规定的水流量调节 主水流的中心部分：离喷嘴 2.5m 处为直径约 120mm 的圆 喷嘴至受试设备表面的距离：约为 3m 持续时间：30min	GB/T 4208 第 2 位特征数字 “6”的有关规定
潜水试验 1	对受试设备正常情况下接触水的部分施加 600 kPa（6 bar）的水压，历时 12h。受试设备的其余部分应置于大气环境中	
潜水试验 2	对受试设备施加 100kPa（1 bar）的水压，历时 5min	
短时浸水试验	受试设备的最高点应位于水表面 1m 以下；水温与受试设备的温差应不大于 5K；将受试设备完全浸入水中，历时 1h	GB/T 4208，第 2 位特征数字 “7”的有关规定
太阳辐射试验	辐射强度：包括受试设备外壳反射来的辐射在内，应为 $1120\text{W/m}^2\pm 10\%$ 辐射源光谱分布及容差：符合 GB/T 2423.24 的有关规定 持续时间：连续暴露在模拟太阳辐射源下，历时 80h	GB/T 2423.24

续表

试 验 项 目	试 验 参 数	试验方法标准号
耐油试验	试验用矿物油应符合下列要求：苯胺点 $(120\pm5)^{\circ}\text{C}$ ；闪点（闭杯试验）不低于 240°C ；黏度 $10\text{CST}\sim 25\text{CST}$ (99°C 时)①	
盐雾（腐蚀）试验	试验溶液：质量分数为 $5\%\pm 1\%$ 的氯化钠（化学纯以上）溶液 相对湿度： $90\%\sim 95\%$ 温度： $(4\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 试验周期：4 个喷雾周期。每个周期连续喷雾时间 2h，7 天湿热贮存期	GB/T 2423.18 试验 Kb

① 美国材料试验协会（ASTM）1 号油、5 号油以及国际标准化组织（ISO）1 号油是符合上述要求的，可以作为进行该项试验的矿物油。

5 舰船电气设备的使用条件

舰船电气设备的使用环境条件要求，详见我国国家军用标准 GJB 4000—2000《舰船通用规范》中，072 章、300 章

300.3.2 条、300.3.3 条以及 400 章 400.3 条的规定。

舰船电气设备的环境条件试验方法，详见我国国家军用标准 GJB 150.1~20《军用设备环境试验方法》。



第4章 船舶电能质量

1 电能质量的定义及分类

1.1 电能质量的定义

现代电能质量可以定义为：导致用户电力设备不能正常工作的电压、电流或频率偏差，造成用电设备故障或错误动作的任何电力问题都是电能质量问题。根据这一定义，电能质量除了保证额定电压和额定频率下的正弦波形外，还包括所有电压瞬变现象，如冲击脉冲、电压下降、瞬时间断等。这个定义概括了电能质量的成因和后果。

1.2 电能质量的分类

为了系统地了解、分析和研究电能质量问题，并能够对实际电能质量反映的问题或测量结果进行分析和判断，从而找出引起电能质量问题的根本原因和采取针对性的改善电能质量方案，对电能质量现象进行科学、合理的分类是非常重要的。

1.2.1 电能质量的基本分类

对于电能质量现象可以根据不同基础来分类。国际电工委员会 IEC 从电磁兼容及相互干扰的途径和频率特性角度考虑，对引起电磁干扰的基本现象进行了分类，如表 1.4-1 所示。

表 1.4-1 IEC 对电能质量根据电磁扰动现象进行的基本分类

序号	电磁干扰现象	对应电能质量产生的影响因素
1	传导型低频现象	谐波、间谐波；载波干扰；电压波动；电压跌落和中断；电压不平衡；工频变化；感应低频电压；交流电网中的直流成分
2	辐射型低频现象	工频电磁场
3	传导型高频现象	感应连续波电压或电流；单方向瞬变；振荡性瞬变
4	辐射型高频现象	工频电磁场；电场；磁场；连续波；瞬变
5	静电放电现象（ESD）	—
6	核电磁脉冲（NEMP）	—

美国电力电子工程师协会 IEEE 根据电压扰动的频谱特征、持续时间、幅值变化等将电能质量问题分成了七大类 13 个子类。图 1.4-1 给出了其分类的示意图。

1.2.2 稳态电能质量和暂态电能质量分类

根据电磁干扰现象的特征进行划分，可将电能质量问题分为稳态电能质量和暂态电能质量两类。其中，稳态电能质量问题是指以波形畸变为特征而引起电能质量污染的问题，主要包括谐波（其特征指标是出现的谐波频谱电压和谐波频谱电流的波形）、电压闪变（其特征指标是波动幅值、调制频率等）、陷波（其特征指标是持续时间、幅值）、三相不对称（其特征指标是不平衡因子）。而暂态电能质量问题是指

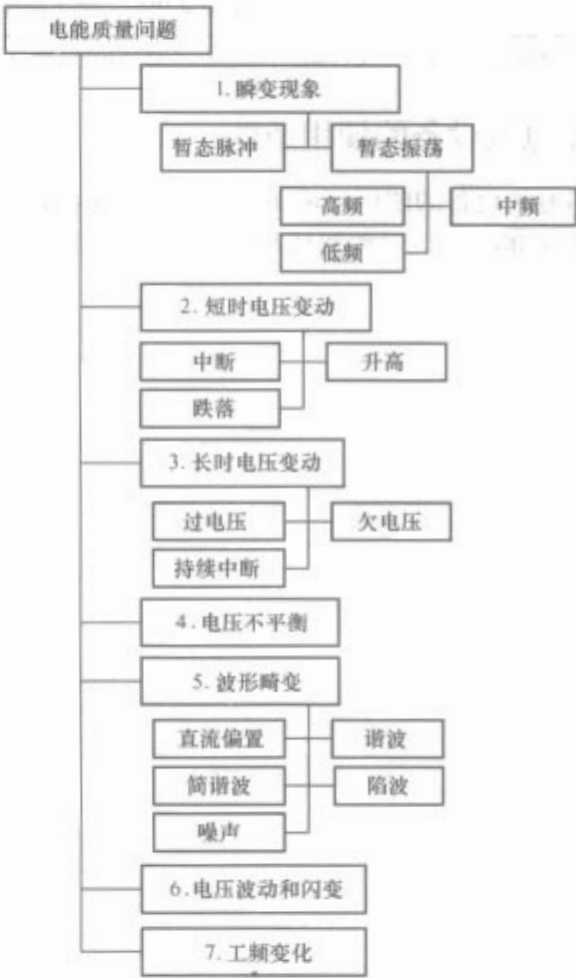


图 1.4-1 IEEE 制定的关于电力系统电磁现象的分类

正弦波形受到暂态扰动而发生畸变，是以频谱和暂态持续时间为特征的，主要包括暂态谐振（其特征指标是波形、峰值和持续时间）、暂态脉冲（其特征指标是电压上升时间、峰值和持续时间）、瞬时电压上升和下陷（其特征指标是变化幅值、持续时间）。

表 1.4-2 列出了描述稳态和暂态电能质量问题的不同属性和特征。

表 1.4-2 描述稳态和暂态电能质量问题的特征和属性

特 征	属 性
稳态现象	幅值、频率、频谱、调制、电源阻抗、陷落深度、陷落面积
暂态现象	上升率、幅值、相位移、持续时间、频率、频谱、发生率、能量强度、电源阻抗

1.2.3 变化型和事件型分类

电能质量问题可以按照电能质量扰动现象的两个重要表现特征——变化的连续性和事件的突发性为基础分成两类。

所谓变化型是指连续出现的电能质量扰动现象，其重要的特征表现为电压或电流的幅值、频率、相位差等在时间轴上的任一时刻总是在发生着小的变化。例如，系统频率是时刻变化的，系统电压也不可能每时每刻恒等于其额定值，与理想值的偏差始终存在。这一类现象包括电压幅值变化、频

率变化、电压与电流间相位变化、电压不平衡、电压波动、谐波电压和电流畸变、电压陷波、主网载波信号干扰等。由于电力系统中的电能质量现象多为随机现象，在对变化型电压和电流进行评估时，通常采用概率统计的方法来处理，即采用概率密度函数给出相应变量在某一确定点的概率值，且用概率分布函数反映该变量处在某一确定范围内的可能性有多大。图 1.4-2、图 1.4-3 所示分别为供电电压幅值的概率密度函数曲线和概率分布函数曲线。根据变化型电能质量的特征，当测量变化型电压和电流时要求连续记录它们的变化值。

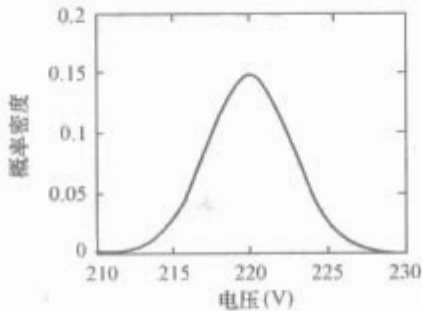


图 1.4-2 电压幅值的概率密度函数曲线

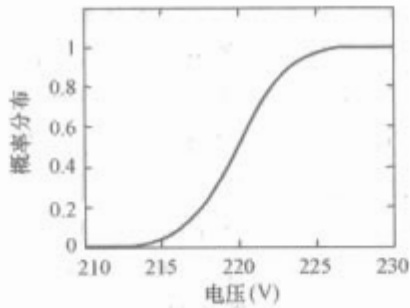


图 1.4-3 电压幅值的概率分布函数曲线

所谓事件型是指突然发生的电能质量扰动现象，其重要的特征表现为电压或电流短时严重偏离其额定值或理想波形。这一类现象包括电压跌落和电压短时中断、欠电压、瞬态过电压、阶梯形电压变化、相位跳变等。在事件型电压和电流评估时，通常采用其特征量，如用幅值偏离量的多少、持续时间以及发生的频次等来描述，并且用概率论和数理统计方法以及可靠性计算来处理。监测事件型电压和电流时，要求有一个事件启动信号，如电压均方根值与额定值偏离某一事先预定的阈值便开始记录，待事件结束后停止记录。

1.2.4 根据变化的特征分类

根据电压、电流变化的特征，可以分为以下三类：

- (1) 电压和频率的偏差：过电压、欠电压、频率偏差。
- (2) 电压和电流的波形：电压跌落、电压突升、电压波动和闪变、谐波、三相不对称。
- (3) 供电连续性：瞬时断电，暂时断电，持续断电。

迄今为止，对电能质量的分类仍存在由于定义不同引起的类别区分界线不很清晰和由于分类方法不同产生的技术名词不统一等问题。对电能质量问题科学、完整的分类对于我们更加深入地了解 and 认识各种电能质量现象是十分有意义的，仍是未来电能质量标准化尚待研究的重要问题。

1.3 电能质量现象描述

为了进一步了解电能质量问题，初步建立电能质量体系的概念，必须了解每种电能质量现象的本质特征。本部分我们重点描述图 1.4-1 中的七大类电能质量现象，使读者加深对电能质量现象的理解。

1.3.1 瞬变现象 (Transient)

瞬变表示一种本质上很短暂但并不期望发生的事件，是指在一定时间间隔内，两个连续稳态之间的一种在极短时间内发生的现象或数量变化。这里我们特指在过电压的情况下持续时间为基波频率几分之一周期的一种电压波形变化。瞬变可以分为暂态脉冲和暂态振荡两类。

1.3.1.1 暂态脉冲 (Transient impulse)

暂态脉冲是指电压或电流在其稳定条件下的一个突发的、非电源频率的变化，且这种变化是单极性的（即要么为正极性要么为负极性）。用以描述它的两个参数是上升时间和衰减时间。引起暂态脉冲的最主要原因是雷电。表 1.4-3 总结了暂态脉冲的一般特征，图 1.4-4 所示为一个典型电压暂态脉冲的电压变化图形。

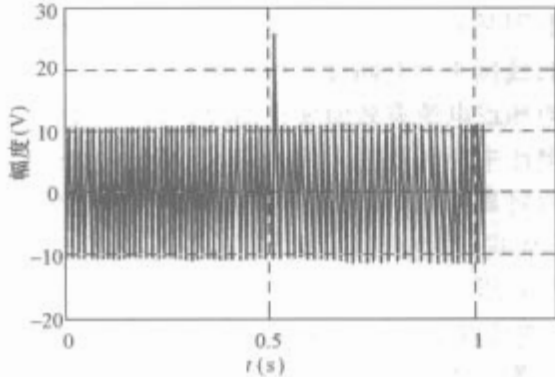


图 1.4-4 电压暂态脉冲的电压变化图形

由于暂态脉冲中含有高频成分，其波形受电路元件的影响变化很快，而且在不同的观测点也呈现出不同的特征，可能激发电力系统电路的固有频率而产生暂态振荡。

表 1.4-3 暂态脉冲的特征、产生原因和解决方法

暂态脉冲	典型频谱	典型持续时间
1—纳秒级	5ns 上升	<50ns
2—微秒级	1 μs 上升	50ns~1ms
3—毫秒级	0.1ms 上升	>1ms
特征指标	峰值、上升时间、持续时间	
产生原因	闪电电击线路、感性电路开合	
后果	设备绝缘破坏	
解决方法	避雷器、滤波器、隔离变压器	

1.3.1.2 暂态振荡 (Transient oscillatory)

暂态振荡是指电压或电流在其稳定条件下的一个突发的、非电源频率的变化，且这种变化是双极性的（即有正极性也有负极性）。暂态振荡由瞬时值迅速改变极性的电压或电流组成，可由其频谱成分、持续时间和幅值大小来描述。根据频谱成分可将暂态振荡分为低频振荡、中频振荡和高频振荡三类。表 1.4-4 总结了不同暂态振荡的特征、产生原因和解决方法，图 1.4-5 所示为一个典型电压暂态振荡的电压变化图形。

表 1.4-4 暂态振荡的特征、产生原因和解决方法

暂态振荡	典型频谱成分	典型持续时间	典型电压幅值
1—低频	<5kHz	0.3~50ms	0~4p. u.
2—中频	5~500kHz	20 μs	0~8p. u.
3—高频	0.5~5MHz	5 μs	0~4p. u.
特征指标	波形、频谱成分、持续时间和幅值大小		
产生原因	线路、负载和电容器组的投切		
后果	设备绝缘破坏、损坏电力电子设备		
解决方法	避雷器、滤波器、隔离变压器		

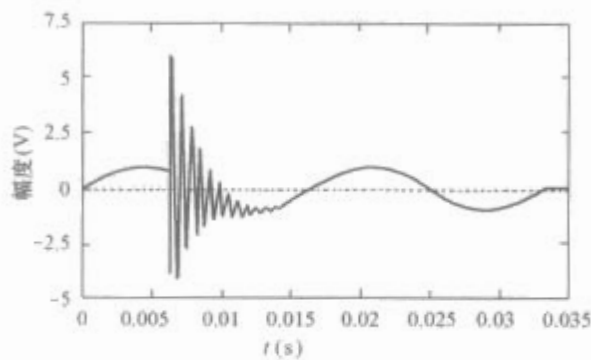


图 1.4-5 电压暂态振荡的电压变化图形

1.3.2 短时电压变动 (Short-duration voltage variation)

短时电压变动是指电压或电流有效值发生变化且持续时间为 0.5 个工频周期~1min 的电磁扰动现象。引起短时电压变动的原因是系统故障、需要高起动电流的大型负荷的接入或电力布线接头处有断续的松动等。

根据电压或电流有效值变化情况,短时电压变动包括电压跌落、电压中断和电压升高。若按持续时间长短来划分,进一步还可将其分成瞬时、暂时和短时三种类型,如表 1.4-5 所示。下面我们对电压跌落、电压中断和电压升高三种现象逐一进行介绍。

1.3.2.1 电压跌落 (Voltage sag)

电压跌落是指工频电压的有效值降至 0.1~0.9p. u., 持续时间为 0.5 个工频周期~1min 的短时间电压变动现象。

发达国家早在 20 世纪 80 年代初就开始研究电压跌落问题并取得大量的应用成果,而我国在这方面的研究尚在起步,可喜的是近些年来许多专家学者集中于这方面的研究,在理论上取得了较大的成绩。

“Voltage sag”在电工词典上的译名是“短时间电压下降”,即指在短时间内(通常指 0.5 个工频周期~1min)供电系统电压突然下降,且超出正常电压偏差允许值,然后又返回到正常的电压水平。定义为“有效值电压突然降到额定电压的: 90%~1%,然后又恢复至正常电压,这一过程的持续时间为 10ms~60s。”电压跌落深度则定义为电压额定值与电压跌落过程中的最小值之差。美国 IEEE 推荐标准 (IEEE Std. 1159—1992) 中对 Voltage sag 的定义为:“工频电压的有效值的下降,其持续时间为 10ms~1min。”另外有的文献将相移也作为描述电压跌落的特征量之一。图 1.4-6 为电压跌落及其有效值变化的波形示意图。

表 1.4-5 短时电压变动的特征、产生原因和解决方法

短时电压变动	典型持续时间	典型电压幅值
A—瞬时		
1—跌落	0.5~30 个工频周期	0.1~0.9p. u.
2—升高	0.5~30 个工频周期	1.1~1.8p. u.
B—暂时		
1—中断	0.5 个工频周期~3s	<0.1p. u.
2—跌落	30 个工频周期~3s	0.1~0.9p. u.
3—升高	30 个工频周期~3s	1.1~1.4p. u.
C—短时		
1—中断	3s~1min	<0.1p. u.
2—跌落	3s~1min	0.1~0.9p. u.
3—升高	3s~1min	1.1~1.2p. u.
特征参数	幅值、有效值/时间、起止时刻、持续时间	
跌落和升高的产生原因	远端系统故障、短时间内大的、非线性负载启动	
解决方法	不间断电源、动态电压恢复器、储能装置	
中断的产生原因	系统故障、用电设备故障或控制失灵	
解决方法	不间断电源、储能装置	

电压跌落通常是由供电系统的短路故障或用户内部的短

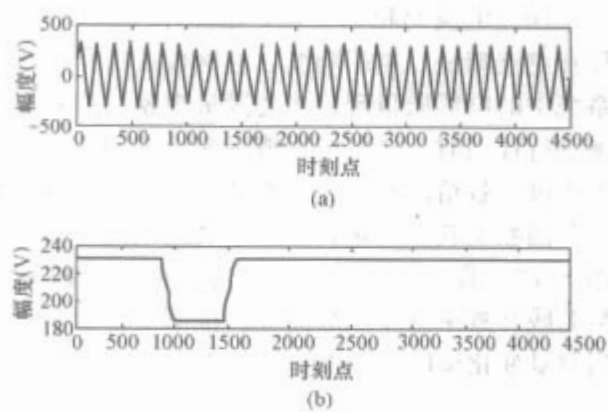


图 1.4-6 电压跌落及其有效值变化的波形示意图
(a) 电压跌落信号; (b) 电压跌落信号的有效值曲线

路故障引起的,是不可预测的随机事件。如雷击和绝缘子污闪引起系统短路,保护迅速将其切除,尔后又自动重合闸成功,这样就会引起 1 次电压跌落过程。即使是某用户发生内部故障短路也会影响到其他用户。

大多数的电压跌落持续时间小于 1s,跌落的深度小于 60% 额定电压。然而较长时间 (>1s) 及较大深度的电压跌落也会不时发生。在某些供电区域,由于用户重负荷或大型电动机的起动汲取大电流也会引起电压跌落。

电压跌落对敏感用电设备危害很大,如可编程控制器、变频调速电机、计算机和接触器等。在现代大规模工业自动化生产中,由计算机等数控技术控制的处理过程复杂而精确,一旦发生电压跌落而造成生产过程中断,则重新启动将耗费数小时之久。舰船上大量使用了基于计算机系统的控制设备、电力装置和网络设备,这些装置对电压跌落非常敏感,很短时间的不正常就可能在舰船内部造成混乱,影响了舰船的安全、经济运行。

根据引起电压跌落的原因,可以将电压跌落分成 3 类:第 1 类叫 FRS (fault related sags),即与故障有关的电压跌落;第 2 类叫 MSRS (motor starting related sags),即与大型电动机的起动有关的电压跌落;第 3 类叫 MRRS (motor re-acceleration related sags),即与电动机的再加速有关的电压跌落,也就是大型电动机运行和故障之间的相互作用对电压跌落的特性有重大的影响。这三种类型的电压跌落具有明显不同的特性。对于 FRS,跌落开始下降和最后恢复都非常迅速,见图 1.4-7;对于 MSRS,跌落事件的恢复需要很长的时间,通常为几百 ms 到几 s,见图 1.4-8;对于 MRRS,在故障开始的时候,大型电动机作为电压源,因而减少了电压降,当故障清除以后,电动机再加速加深了电压跌落导致延长了电压跌落的恢复时间,见图 1.4-9。

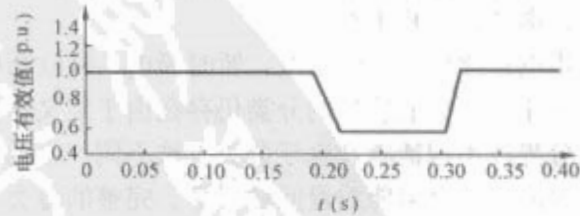


图 1.4-7 FRS 的特性示意图

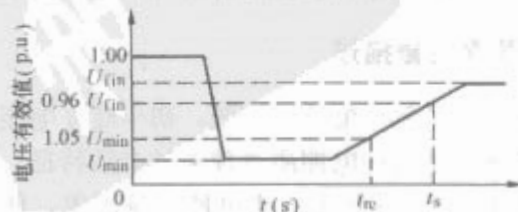


图 1.4-8 MSRS 的特性示意图

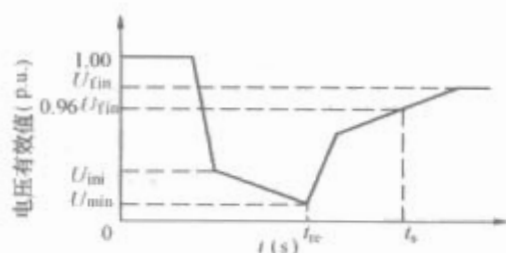


图 1.4-9 MRRS 的特性示意图

另外，通常与故障有关的跌落比与故障无关的跌落有相对大一些的相位移。表示 FRS 特征的参数包括电压有效值的最小值 U_{\min} ，电压有效值的最大值 U_{\max} ，电压有效值的平均值 U_{ave} ，跌落最终的电压有效值 U_{fin} ，峰值电压 U_p ，跌落开始时间 t_s ，跌落结束时间 t_e ，跌落持续时间 t_{sd} ，跌落初相位 a_{ini} ，跌落初相移 a_{pase} ，跌落初相移变化率 γ_{pase} ，跌落结束时的相移 a_{end} ，跌落结束时的初相移 a_{pase} ，跌落结束时的相移变化率 γ_{pase} ，总谐波畸变 THD (total harmonic distortion)，有效值不平衡度 γ_{ub} ，三相相角偏差 PADD (phase angle difference deviation)。和 FRS 的特征相比较，表示 MSRS 的特征有 2 个新的参数——跌落恢复时间 t_{re} 和恢复持续时间 t_{rd} 。另一方面，由于 MSRS 的电压恢复非常慢，难以精确确定和计算 a_{end} 、 a_{pase} 、 γ_{pase} ，故在 MSRS 中不考虑这 3 个参数。另外 FRS 的起始时间 t_s 、跌落结束时间 t_e 可用小波变换精确确定，但是小波变换不能精确确定 MSRS 的 t_s 和 t_e ，因此要用别的方法确定 MSRS 的 t_s 和 t_e 。和 MSRS 的特征相比较，MRRS 添加了 1 个新的参数——跌落初时电压的有效值 U_{ini} 。这反映了在 MRRS 故障开始的时候，电动机作为一个电压源，因此电压逐渐降到最小值，而不是像在 FRS、MSRS 中电压突然降到最小值，其他的参数和 MSRS 一样。

1.3.2.2 电压中断 (Voltage interruption)

电压中断是指供电电压有效值降低到 0.1 p.u. 以下且持续时间在 0.5 个工频周期~1min 的短时间电压变动现象。由于电压中断的幅值总是低于额定值的 10%，因此用持续时间来表征它。

电压中断可能是由系统故障、设备故障以及控制失灵引起。由电力系统一次故障引起的电压中断，其持续时间由电力系统保护装置的動作时间决定。由设备故障或松动导致的电压中断，其持续时间是不确定的。图 1.4-10 是由单相接地短路引起的电压中断波形。

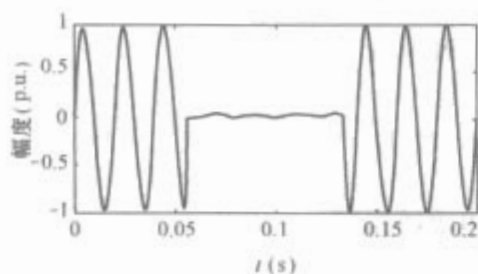


图 1.4-10 由单相接地短路引起的电压中断波形

1.3.2.3 电压升高 (Voltage swell)

电压升高是指供电电压有效值上升到 1.1~1.8 p.u. 且持续时间在 0.5 个工频周期~1min 的短时间电压变动现象。

电压升高与电压跌落一样也与系统的故障有关，但它不如电压跌落发生频繁。在中性点不接地系统中，发生瞬时单相接地故障时健全相的对地电压会升至额定电压的 $\sqrt{3}$ 倍，这一过程就是电压升高。另外，切除一个大负荷或对一台大容量电容器组充电都有可能产生电压升高。电压升高的特征参

数是其幅度大小和持续时间。在一次故障中，电压升高的严重程度与故障位置、系统阻抗和系统是否接地有关。图 1.4-11 是一次单相接地故障引起的非故障相电压升高波形。

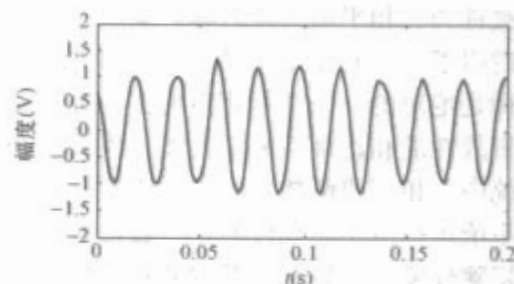


图 1.4-11 一次单相接地故障引起的非故障相电压升高波形

1.3.3 长时电压变动 (Long-duration voltage variation)

长时电压变动是指在工频条件下，供电电压有效值超出了规定的稳定电压容限，且持续时间超过 1min 的电压扰动现象。长时电压扰动分为过电压、欠电压和持续中断三种情况。一般过电压和欠电压并不是系统故障所产生的，而是由负荷的变动以及系统的开关操作引起的。一般取电压有效值对时间的变化曲线作为长时间电压变动的典型波形。

1.3.3.1 过电压 (Over-voltage)

过电压是指在工频条件下，交流电压的有效值大于 1.1 p.u.，且持续时间在 1min 以上的电压变动事件。它通常是由负荷投切（如：切除一个容量较大的负荷或者投入一台电容器组）引起的。如果电压控制不足、变压器分接头的设置不当也会导致系统过电压的出现。

1.3.3.2 欠电压 (Under-voltage)

欠电压是指在工频条件下，交流电压的有效值小于 0.9 p.u.，且持续时间在 1min 以上的电压变动事件。欠电压产生的原因与过电压产生的原因刚好相反，投入一个大负荷或切除一台电容器组均可能引起欠电压。过负荷线路也可能引起欠电压。

1.3.3.3 持续中断 (Sustained interruption)

持续中断是指供电电压为零且持续时间超过 1min。超过 1min 的电压中断往往是永久性的，通常需要依靠人力维修数分钟或数小时才能使系统恢复供电。它不同于预先知道的电气设备计划检修或更换而停电的情况，是一种特殊的电力系统现象。有分析认为，如果由于电气设备计划检修或线路更改等出现的预知计划停电，或由于工程设计不当或电力供应不足造成的不得已停电，则不属于电能质量问题，应归为传统的供电可靠性问题或工程质量问题。

表 1.4-6 总结了过电压、欠电压和持续中断的本质特征。

表 1.4-6 过电压、欠电压和持续中断的特征、产生原因和解决方法

电能质量类型	典型持续时间	典型电压幅度
1. 过电压	>1min	1.1~1.2 p.u.
2. 欠电压	>1min	0.8~0.9 p.u.
3. 持续中断	>1min	0.0 p.u.
特征参数	有效值/时间，统计值	
产生原因	电机启动，负荷变化	
解决方法	电压调节器	

1.3.4 电压不平衡 (Voltage unbalance)

在理想的三相交流系统中,三相电压应该是具有相同的数值,且按照A、B、C三相顺序相互成 120° 角度差,这样的电力系统被称为三相平衡(或对称)系统。然而由于存在各种不平衡的因素,实际上的电力系统并不是完全平衡的。系统的不平衡是绝对的,平衡是相对的。不平衡的因素主要可以归结为事故性的和正常性的两大类。事故性的不平衡是由于三相系统中一相(或两相)出现故障所导致的,这种不平衡工况是系统运行所不能允许的,一般,继电保护、自动装置等动作切除故障元件后在短期内使系统恢复正常。正常的不平衡则是负荷不平衡、系统三相阻抗不对称以及消弧线圈的不正确调谐所导致。作为电能质量指标之一的电压不平衡是针对正常不平衡运行工况制定的。

三相电压不平衡会对电力系统和用户造成一系列的危害,主要有:①引起旋转电机的附加发热和振荡,危及其安全运行和正常出力;②引起以负序分量为起动元件的多种保护误动作;③使半导体变流设备产生附加的谐波电流;④使发电机组的利用率下降;⑤将引起电网的损耗增加;⑥会增加对通信系统的干扰,影响正常的通信质量。

电压不平衡度的定义通常有两种:一是直接利用三相电压值(有效值或幅值)进行定义,即把三相电压相对于其平均值的最大偏差和该平均值的百分比作为三相线电压的不平衡度,它是国际电气制造业协会(NEMA)于1980年指定的。显然,这种定义不需要进行任何中间变换,当已知三相电压时,很容易根据该定义求得三相电压的不平衡度。不足之处是它不包含任何序分量信息,在需要讨论各序分量(如负序分量)的影响时,该定义就显得不实用了。另一种定义是基于三相对称分量法的,即用负序或零序分量与正序分量的百分比定义为三相电压不平衡度。该定义在分析负序分量的影响时得到了较多的应用。但该定义没有反映正序和负序(或零序)之间的相位信息,因此不利于讨论电压相位不对称问题。有文献指出,分别变化其中一相电压的幅值和相位(其他两相的幅值和相位不变),可以得到同样大小的负序分量与正序分量幅值的比值,但它们引起的感应电机起动暂态过程是不同的。此时,采用电压负序相量(或零序相量)和正序相量的比值作为三相电压不平衡度的定义来分析电压不平衡的影响将更合适。

1.3.5 波形畸变 (Voltage distortion)

波形畸变定义为电压或电流波形偏离稳态工频正弦波形,它由畸变信号的频谱来描述。波形畸变有五种类型:直流偏置、谐波、间谐波、陷波、噪声。

1.3.5.1 直流偏置 (DC offset)

直流偏置定义为交流系统中出现直流电压或电流。它可能是由地磁干扰或半波整流所引起的。直流偏置可以引起变压器饱和而增加变压器温度减少其寿命。直流分量也可能引起接地极和其他电气连接设备的电解腐蚀。

1.3.5.2 谐波 (Harmonic)

(1) 稳态谐波 (Stationary Harmonic)。稳态谐波即我们通常所说的谐波,是指具有电源系统指定运行频率(简称工频,通常为50Hz或60Hz)整数倍的正弦电压或电流,各次谐波的幅值和相位是不随时间而变化的。其产生的根本原因是由于电力系统中某些设备和负荷的非线性特性,即所增加的电压与产生的电流不成线性关系而造成的电流、电压波形畸变。

一个非正弦的周期波(如:电压、电流、磁通等),可以分解为一个同频率和很多整数倍该频率的正弦波之和。其

中频率与原非正弦波频率相同的正弦波称为基波,频率为基波整数倍的正弦波称为高次谐波或谐波。谐波是一个周期性电量的正弦分量,其频率为基波频率的整数倍。

一切非线性的设备和负荷都是谐波源。谐波源产生的谐波与其非线性特性有关。当前,电力系统的谐波源,其非线性特性主要有三大类:

1) 铁磁饱和型:各种铁心设备,如变压器、电抗器等,其铁磁饱和特性呈非线性。

2) 电子开关型:主要为各种交直流换流装置(整流器、逆变器等)、双相晶闸管、可控开关设备等。在电力系统内部,如高压直流输电系统中应用的整流阀、逆变阀等,在柔性输电系统中和补偿设备中采用的电力电子设备等。其非线性呈现交流波形的开关切合和换相特性。随着大功率电力电子设备的出现,现代电力系统中,这类设备的数量将会迅速增加,值得我们引起重视。

3) 电弧型:各种炼钢电弧炉在熔化期间以及交流电弧焊机在焊接期间,其电弧的特点和剧烈变动形成的高度非线性,使电流不规则地波动,其非线性呈现为电弧电压与电弧电流之间的不规则、随机变化的V-A特性。

谐波对电力系统中电能质量的污染日益严重,主要危害有:

1) 大大增加了电力系统中发生谐振的可能性,从而造成很高的过电压或过电流,引发事故的可能性增加。

2) 增加附加损耗,降低发电机、输电线路、用电设备等等的利用效率,占用设备容量,增加投资,影响利用率。

3) 使电气设备,如旋转电机、电容器、变压器等,运行不正常,加速绝缘老化,缩短电力设备的使用寿命,增加设备维护费用。

4) 使继电保护、自动装置、计算机系统,以及许多用电设备运转不正常或不能正常动作或操作。

5) 使测量和计量仪器、仪表等不能正常指示或计量。

6) 干扰通信系统,降低信号的传输质量。破坏信号的正常传递,甚至损坏通信设备等。

对于稳态谐波,我们通常用各次谐波分量幅值、相位角的频谱和各次谐波含有率来描述其波形畸变水平。也可以用总谐波畸变率作为测量信号谐波畸变的度量标准。式(1.4-1)~式(1.4-4)给出了计算各次谐波电压、电流含有率和总谐波电压、电流畸变率的计算式

$$\text{谐波电压含有率 } HRU_k = U_k / U_1 \times 100\% \quad (1.4-1)$$

$$\text{谐波电流含有率 } HRI_k = I_k / I_1 \times 100\% \quad (1.4-2)$$

总谐波电压畸变率

$$THD_U = \sqrt{\sum_{k=2}^N U_k^2} / U_1 \times 100\% \quad (1.4-3)$$

总谐波电流畸变率

$$THD_I = \sqrt{\sum_{k=2}^M I_k^2} / I_1 \times 100\% \quad (1.4-4)$$

式中: U_k , U_1 分别为 k 次谐波电压和基波电压的幅值; I_k , I_1 分别为 k 次谐波电流和基波电流的幅值; N , M 分别为总的谐波电压和电流次数。

图1.4-12给出了稳态谐波电压及其各次谐波含有率的示意图。

(2) 时变谐波 (Time-varying Harmonic)。由于电力系统中负载大多是动态的,特别是大型的工业负载如电弧炉、轧钢机的起停使得电网的电压和电流波形是时变的,因此产

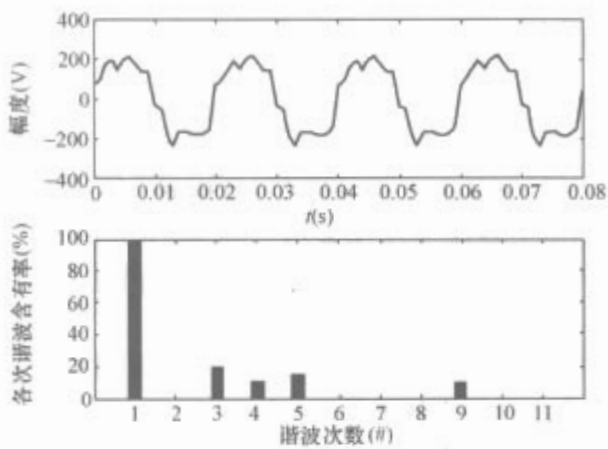


图 1.4-12 稳态谐波电压及其各次谐波含有率的示意图

生了时变谐波的概念。时变谐波是一种频率、幅值、相位随时间变化的谐波。通常用不同时刻下各次谐波的频率、幅值、相位参数来描述它。

图 1.4-13 给出了一个时变谐波电压示意图。

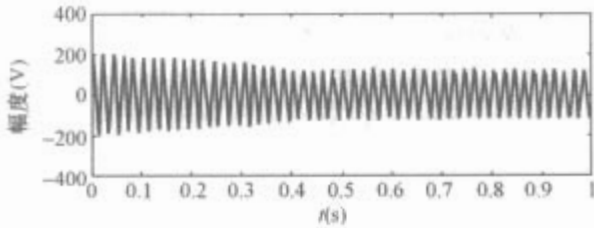


图 1.4-13 时变谐波电压示意图

1.3.5.3 间谐波 (Inter-harmonic)

间谐波是指具有电源系统指定运行频率非整数倍的电压或电流。这类谐波可以是离散频谱的或连续频谱的。所有非线性的波动负荷（电弧炉、电焊机、晶闸管供电的轧机等），各种变频调速装置，同步串级调速装置以及感应电动机等均为间谐波源，因此间谐波广泛存在于电力系统中。

电力系统中的间谐波电压会引起灯光闪烁，对音频脉冲控制的接收机、电视机、无线电收音机或其他音频设备造成干扰，还可能引起感应电动机噪声和振动；引起低频继电器的异常运行以及无源电力滤波器过电流跳闸等问题。因此间谐波电压应限制在足够低的水平（IEC 61000-3-6 建议将间谐波电压水平限制到 0.2% 以下）。

目前公用电网谐波国标中并未对间谐波作出规定，应尽快补充对间谐波的规定，包括限值、测量、取值以及评估方法等。

表 1.4-7 总结了直流偏置、谐波、间谐波的特征、产生原因和解决方法。

表 1.4-7 直流偏置、谐波、间谐波的特征、产生原因和解决方法

波形畸变	典型频谱	典型持续时间	典型电压幅度
1. 直流偏置	—	稳态	0~0.1%
2. 谐波	0~100 th	稳态	0~20%
3. 间谐波	0~6kHz	稳态	0~2%
特征参数	谐波频谱、总谐波畸变率、统计量		
产生原因	非线性负载、波动负载、系统谐振		
解决方法	有源和无源滤波器、变压器		

1.3.5.4 陷波 (Notching)

陷波定义为电力电子装置在正常工作情况下，交流电流从一相切换到另一相时产生的周期性电压扰动。一般用下陷深度和宽度来表征。图 1.4-14 给出了电压陷波示意图。

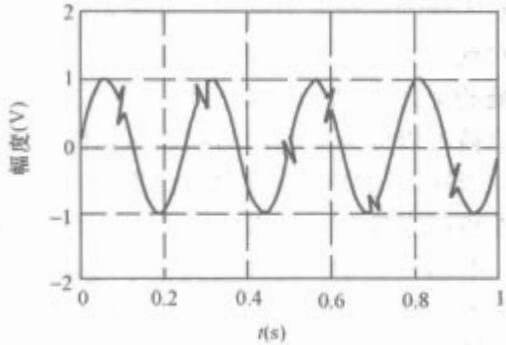


图 1.4-14 电压陷波示意图

1.3.5.5 噪声 (Noise)

噪声是一种不期望的电力信号，带有低于 200kHz 的宽带频谱，叠加在电力系统的相线或中性线的电压或电流上。电力电子装置、控制电路、电弧设备、带有固态整流器的负载和供电电源的投切都可以引起噪声。由于不正确的接地未能将噪声传导至远离电力系统也能产生噪声问题。噪声可以对电子设备如计算机、可编程控制器等的正常运行造成危害。利用滤波器、隔离变压器和电力线调节器可以减缓噪声问题。图 1.4-15 给出了施加在电力信号上的畸变噪声示意图。

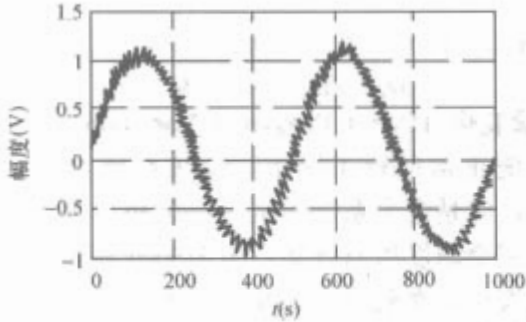


图 1.4-15 施加在电力信号上的畸变噪声示意图

1.3.6 电压波动和闪变 (Voltage fluctuation/flicker)

电力系统的电压波动主要是由具有冲击性功率的负荷引起的，如变频调速装置、炼钢电弧炉、电气化铁路和轧钢机等。这些非线性、不平衡冲击性负荷在生产过程中有功和无功率随机地或周期性地大幅度变动，当其波动电流流过供电线路阻抗时产生变动的压降，导致同一电网上其他用户电压以相同的频率波动。这种电压幅值在一定范围内（通常为额定值的 90%~110%）有规律或随机地变化，即称为电压波动。电压波动通常会引起许多电气设备不能正常工作，如影响电视画面质量、使电动机转速脉动、使电子仪器工作失常、使白炽灯光发生闪烁等。

电压波动值为电压有效值的两个极值 U_{\max} 和 U_{\min} 之差 ΔU ，通常用标称电压 U_N 的百分数来表示其相对百分值，即

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (1.4-5)$$

单位时间内电压变动的次数称为电压波动的频度 r ，一般用 min^{-1} 或 s^{-1} 作为频度的单位。

电压波动波形，在分析时可以抽象地将工频电压 u （或 U ）看作载波，将波动电压 v 看作调幅波。波动电压可能是具有单一频率的正弦波，也可能是具有任意波形的调幅波。

电流幅度的连续变化引起的电压变化称为闪变，闪变是

人们对照度波动的主观视感。闪变的主要决定因素有：

- (1) 供电电压波动的幅值、频率和波形。
- (2) 照明装置，以白炽灯的照度波动影响最大，而且与白炽灯的瓦数和额定电压等有关。
- (3) 人对闪变的主观视力感受。由于人们的主观视感的差异，需要对观察者的闪变作抽样调查。

供电系统的电压波动和闪变由用户的波动性负荷所引起。波动性负荷可以分为周期性的和非周期性的两大类，其中，周期性的或接近周期性的波动性负荷对闪变的影响更为严重。波动性负荷主要有：电弧炉、感应炉的变频电源、绞车、轧钢机、电动机起动（尤其是高频率起动的工况）、矿山挖掘机、锯木机和粉碎机等。这些波动性负荷，影响和危害电网公共连接点（PCC）上的其他用户的用电设备，必须引起高度重视。

图 1.4-16 给出了由电压波动引起电压闪变现象的波形示意图。

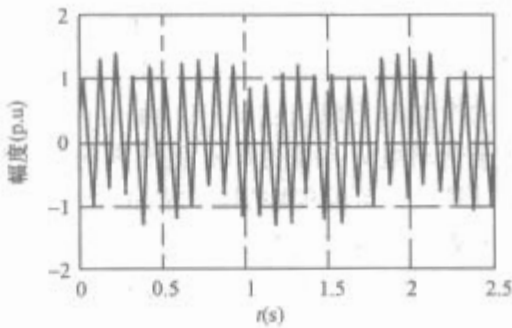


图 1.4-16 由电压波动引起的电压闪变现象的波形示意图

1.3.7 工频变化 (Power Frequency Variation)

电力系统正常运行工况下，应该在标称值（或额定值）下运行，但是电力系统的负荷是随机变动的，电力系统没有权力完全调度用电设备，电源的处理完全是决定于实际负荷的大小，而电源系统及其调速系统均有一定的机械惯性和电气惯性，致使电力系统的频率总是在一定的范围内波动，这种电力系统的频率偏离其标称值（额定值）的现象称为工频变化。频率变化的大小以及持续时间是依赖于负荷的特性以及发电机控制系统特性以及对负荷波动的反应能力的。运行频率偏差对电力系统及其设备的危害程度取决于偏移的大小和持续时间，频率偏差超过±0.2Hz可能危及系统的安全稳定及设备的安全运行，甚至引起系统崩溃。

现代互联电力系统中极少出现频率大的波动，但对于如舰船独立电网等小的发供电系统来说，由于其难以做到发电机对负荷急剧变化的快速反应，所以这种系统中很可能出现频率波动现象。

表 1.4-8 总结了电压不平衡、陷波、噪声、电压波动和工频变化的特征参数。

表 1.4-8 电压不平衡、陷波、噪声、电压波动和工频变化的特征参数

电能质量类型	典型频谱	典型持续时间	典型电压幅度
电压不平衡	—	稳态	0.5%~2%
陷波	—	稳态	—
噪声	宽带	稳态	0~1%
电压波动	<25Hz	间歇	0.1%~7%
工频变化	—	<10s	—

2 船舶电能界面要求

2.1 电制

2.1.1 主电力系统和正常照明系统的电制

船舶主电力系统应优先采用三相 380V、50Hz 不接地制，正常照明系统由主电力系统通过变压器供电，采用交流三相或单相 220V、50Hz 不接地制。

常规动力潜艇的主电力系统可以采用直流幅压 175~320V 或 350~640V 不接地制。

2.1.2 二次电力系统

(1) 可以使用三相或单相 50Hz，380V、220V 或 115V 和三相或单相 400Hz，380V、220V 或 115V。核潜艇还可使用直流幅压 175~320V 和直流恒压 220V。

(2) 舰载航空勤务部门和直升机设备维修部门可使用 400Hz、115V/220V 三相四线中性点接地制。

(3) 在确认需要时，可使用直流 220V、115V 或 24V 和单相 50Hz、24V。

2.1.3 用电设备电制优先次序

(1) 电压。电压要求如下：

1) 大于等于 5kVA 的全部机械和设备，应选用 380V、三相交流定额。

2) 小于 5kVA 的全部机械和设备，如果可行，也应选用 380V、三相交流定额，如果这种定额不可行，则按下列次序优选：380V、单相；220V、三相；220V、单相；115V、三相；115V、单相。

3) 特殊电压。115V/220V、三相、四线、中性线接地。这个电压仅适合于 400Hz 航空勤务设备。

(2) 频率。用电设备应尽可能设计成以 50Hz 运行。在需要时，用电设备也可设计成以 400Hz 运行，但应经过论证。

2.2 船舶电力界面品质要求

2.2.1 电力界面

电力系统的供电界面置于用电设备（或分系统）的输入端，有关界面品质的规定不适合于用电设备（或分系统）的内部。

2.2.2 交流

对交流用电设备供电的电力界面品质，应符合表 1.4-9 规定的三种标准电力特性，用电设备应能在这种条件下正常工作，同时，用电设备的工作不应引起界面处品质的恶化超出表 1.4-9 允许的限度。三种标准电力优选顺序依次为 I 型、II 型及 III 型。三种标准电力界面特性见表 1.4-9。

为了保证供电界面处的品质，发电、配电设备的工作特性应符合该标准的相应要求。

交流 24V 电力界面的品质，如无专门说明，可归为表 1.4-9 中的 I 型指标。

2.2.3 直流

各类直流电力系统的界面品质，除船舶技术指标书中有规定者外，可按如下规定控制：

(1) 电压容许变化范围（以用电设备的额定电压 U_N 为基准）：

1) 一般直流电源（指由恒定发电机或整流器供电者），+5%~-7%。

2) 潜艇主蓄电池电源，如幅压范围。

3) 普通船用蓄电池电源：一般情况，+15%~-20%；蓄电池充电时用电设备仍接电者，+30%~-25%。

表 1.4-9 交流三种标准电力界面特性

电 能 品 质		I 型	II 型	III 型
电 压	(1) 用电设备标称电压 (有效值)	380V 或 220V	380V 或 220V 或 115V	380V 或 220V 或 115V 或 115/220V ^①
	(2) 用电设备电压允差 1) 三相线电压的平均值允差 2) 包括 (2) 1) 和 (3) 项的任一线电压容差	±5%; ±7%	±5%; ±7%	±2%; ±3%
	(3) 线电压不平衡允差	3%	3%	2%
	(4) 电压的周期性变化允差	2%	2%	1%
	(5) 瞬态电压 1) 瞬态电压允差 2) 瞬态电压恢复时间	±6%; 2s	±16%; 2s	±5%; 0.25s
	(6) 尖峰电压 (峰值)	2500V (对 380V 系统) 1700V (对 220V 系统)	2500V (对 380V 系统) 1700V (对 220V 系统) 1000V (对 115V 系统)	2500V (对 380V 系统) 1700V (对 220V 系统) 1000V (对 115V 系统)
	(7) 瞬态或故障情况除外, 由 (2) ^① 和 (4) 项组合引起的与用电设备标称电压的最大偏离	±6%	±6%	±2.5%
	(8) 故障情况除外, 由 (2) ^① (4) 和 (5) ^① 项组合引起的与用电设备标称电压的最大偏离	±20%	±20%	±5.5%
波 形	(9) 正弦性畸变率	5%	5%	3%
	(10) 最大单次谐波含量	3%	3%	2%
	(11) 偏离系数	5%	5%	5%
频 率	(12) 标称频率	50Hz	400Hz	400Hz
	(13) 频率允差	±3%	±5%	±0.5%
	(14) 频率的周期性变化允差	0.5%	0.5%	0.5%
	(15) 瞬态频率 1) 瞬态频率允差 2) 恢复时间	±4%; 2s	±4%; 2s	±1%; 0.25s
	(16) 故障情况除外, 由 (13)、(14) 和 (15) 1) 项组合引起的与标称频率的最大偏离	±5.5%	±6.5%	±1.5%
供电连续性	(17) 典型的断电时间	0.5~20s	0.5~20s	0.5~3s

① 115V/200V、四线中性线接地系统, 当其经线电压调节器供电时, III 型的电力品质适用于相电压。

(2) 电压的相对峰-谷纹波系数 (q): 发电机供电 $\leq 2\%$; 整流器供电 $\leq 15\%$ 。

(3) 过电压峰值: 应不超过图 1.4-17 规定的数量值。当额定电压 U_N 大于 50V 时, 用电设备可能承受的最高电压峰值 U_L 可按下式计算

$$U_L = 1400 + 2.3U_{dN} \quad (V) \quad (1.4-6)$$

式中: U_{dN} 为设备额定直流电压, V。

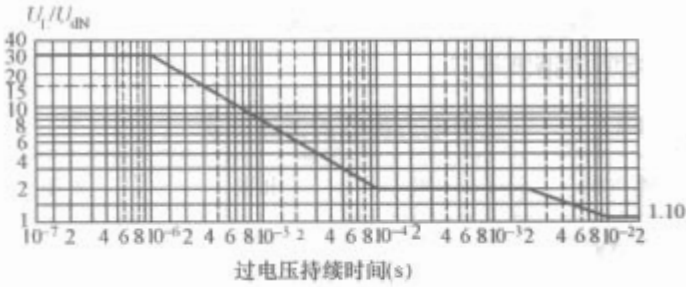


图 1.4-17 最大预期过电压 U_L

与瞬态过电压持续时间的关系
(虚线表示额定电压 U_{dN} 为 110V 时坐标的最高限制线)

(4) 输入过电压瞬态能量: $U_N \leq 260V$ 时, 不大于 4J; $U_N > 260V$ 时, 按产品技术规格书中规定。

3 船舶电能质量的要求

船舶电力系统是一个独立的、小型的完整电力系统, 主要由电源设备、配电系统和负载组成。由于其系统的容量较小, 高能武器等冲击性负载的大量使用, 使独立电网中的短时电压波动问题比较严重; 雷达、导航等非线性负载直接挂在电网上, 对电力系统的影响很强, 使得电网的电压波形发生畸变, 引起严重的时变谐波问题; 由于负载的变动剧烈, 容易产生连续的、频繁的动态大功率冲击。由于这些因素的存在, 使得船舶独立电力系统与陆用大电网有着更严重的电能质量问题, 因此对船舶电能质量的要求与陆用电力系统电能质量的要求是有差别的, 我们主要依据 GJB 4000—2000《舰船电力系统通用规范》做出对船舶电能质量的要求。

3.1 交流电力系统的电能质量要求

3.1.1 电力类型

船舶交流电力系统分为三类标准的类型: I 型 50Hz 电力、II 型和 III 型 400Hz 电力。

(1) I 型 50Hz 电力。由舰船主电站供电的主配电系统应为 50Hz、380V 不接地系统。由舰船配电系统通过变压器

供电的舰船照明系统应为 50Hz、220V 不接地系统。由变压器供电的三相 50Hz、220V 不接地系统也可用于向其他用电设备（如小容量电子设备和生活电器）供电。舰船主电站及主配电系统和照明系统应被设计成可向用电设备提供 I 型电力。

(2) II 型和 III 型 400Hz 电力。由电动发电机组、静止式变频器或逆变器供电的系统应为三相或单相 400Hz、380V、220V 或 115V 不接地系统。变电设备及配电系统设计成可向用电设备提供 II 型和 III 型电力，且 II 型电力的使用应优于 III 型电力。只有在 II 型电力无法满足使用要求而必须使用具有更佳特性的电力时，才可使用 III 型电力。对仅用于航空勤务和航空维修的局部专用配电系统应为三相四线 400Hz、115V/220V 中性点接地系统。

3.1.2 交流电力系统的电能质量要求

3.1.2.1 电压允差 (Voltage tolerance)

电压允差包括两种类型：用电设备的电压允差、电压的周期性变化允差。

(1) 用电设备的电压允差 (user voltage tolerance)。正常运行时允许的以用电设备标称电压百分数表示的最大电压变化，但不包括瞬态电压允差和电压周期性变化允差。用电设备的电压允差包括由负载变化、环境（温度、湿度、振动、倾斜）、配电板仪表误差和漂移所引起的种种变化。

(2) 电压的周期性变化允差（幅值）[voltage cycle variation tolerance (amplitude)]。又称为电压调制度。定义为用电设备允许的周期性变化（波峰至波谷）。如由于有规则的重复脉冲负载所引起的变化。为便于规定，一般认为电压周期性变化的周期大于 1s、小于 10s。式 (1.4-7) 给出了电压的周期性变化偏差的计算式，其中所有的电压值全为峰值或全为有效值

周期性电压偏差 (%) = $\frac{U(\text{最大值}) - U(\text{最小值})}{2 \times U(\text{标称值})} \times 100\%$ (1.4-7)

(3) 三种电力类型的电压允差。表 1.4-10 给出了三种电力类型的电压允差要求。

表 1.4-10 三种电力类型的电压允差要求

电能质量	I 型	II 型	III 型
用电设备标称电压 (有效值)	380V 或 220V	380V 或 220V 或 115V	380V 或 220V 或 115V 或 115/220V ^①
用电设备电压允差			
(a) 三相线电压的平均值允差	±5%	±5%	±2%
(b) 任一线电压容差	±7%	±7%	±3%
电压的周期性变化允差	2%	2%	1%

① 115V/200V、四线中性线接地系统，当其经线电压调节器供电时，III 型的电能质量适用于相电压。

3.1.2.2 频率允差 (frequency tolerance)

频率允差包括三种类型：频率允差、频率的周期性变化允差、瞬态频率允差。

(1) 频率允差 (frequency tolerance)。在正常运行期间，频率与标称频率之间的允许最大偏差，不包括瞬态频率和频率的周期性变化允差，以标称频率的百分数表示。频率允差包括由负载变化、环境（温度、湿度、振动、倾斜）、配电板仪表误差和漂移所引起的种种变化。式 (1.4-8) 给出了

频率偏差的计算式

频率偏差 (%) = $\frac{\text{实测频率} - \text{标称频率}}{\text{标称频率}} \times 100\%$ (1.4-8)

(2) 频率的周期性变化允差 (frequency cycle variation tolerance)。在正常运行期间允许的频率周期性变化，如由于有规则的重复脉冲负载所引起的变化。为便于规定，一般认为频率的周期性变化不超过 10s。式 (1.4-9) 给出了频率周期性变化偏差的计算式

频率周期性变化偏差 (%) = $\frac{F(\text{最大值}) - F(\text{最小值})}{2 \times F(\text{标称值})} \times 100\%$ (1.4-9)

(3) 瞬态频率允差 (frequency transient tolerance)。超过频率允差以外的频率突然变化限值，以标称频率的百分数表示。从扰动开始至规定的恢复时间，它恢复并保持在频率允差以内。瞬态频率允差不包括频率允差。

(4) 三种电力类型的频率允差。表 1.4-11 给出了三种电力类型的频率允差要求。

表 1.4-11 三种电力类型的频率允差要求

电能质量	I 型	II 型	III 型
标称频率	50Hz	400Hz	400Hz
频率允差	±3%	±5%	±0.5%
频率的周期性变化允差	0.5%	0.5%	0.5%
瞬态电压允差	±4%	±4%	±1%
故障情况除外，由频率偏差、频率的周期性变化偏差、瞬态电压偏差组合引起的与标称频率的最大偏差	±5.5%	±6.5%	±1.5%

3.1.2.3 谐波 (Harmonics)

(1) 单次谐波含量 (single harmonic content)。单次谐波的有效值与基波有效值之比，以百分数表示。相当于陆用电网中的谐波含有率。

(2) 正弦性畸变率 (voltage total harmonic distortion)。电压波形中不包括基波在内的所有各次谐波有效值平方和的平方根与该波形基波有效值之比，以百分数表示。相当于陆用电网中的 THD。

(3) 偏离系数 (deviation factor)。电压波形和同样频率的等效正弦波两者在对应纵坐标上的最大差值与电压的等效正弦波的最大纵坐标之比，此时两波的叠加方式应使得最大差值尽可能小，用公式表示如下

偏离系数 (%) = $\frac{\text{对应纵坐标最大差值}}{\text{等效正弦波的最大纵坐标}} \times 100\%$ (1.4-10)

(4) 三种电力类型的谐波要求。表 1.4-12 给出了对三种电力类型的谐波要求。

表 1.4-12 三种电力类型的谐波要求

电能质量	I 型	II 型	III 型
最大单次谐波含量	3%	3%	2%
正弦性畸变率	5%	5%	3%
偏离系数	5%	5%	5%

3.1.2.4 电压、电流不平衡允差 (Voltage/Current unbalance)

(1) 线电压不平衡允差 (三相系统) [line voltage un-

balance tolerance (three phase system)]。允许的线电压最大值和最小值之差，以用电设备标称电压百分数表示。式 (1.4-11) 给出了线电压不平衡度的计算式

线电压不平衡度(%)=
$$\frac{\text{最大一相线电压}-\text{最小一相线电压}}{\text{用电设备标称电压}} \times 100\%$$
 (1.4-11)

(2) 电流不平衡度 (current unbanlance)。最大线电流最小线电流之间的差值相对于三相平均线电流的百分比，其计算式如下

$$\begin{cases} I_{av} = \frac{I_{UV} + I_{VW} + I_{WU}}{3} \\ \text{电流不平衡度 \%} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{av}} \times 100\% \end{cases}$$
 (1.4-12)

式中：I_{UV}、I_{VW}、I_{WU}分别为三相线电流；I_{av}为三相平均线电流；I_{max}和 I_{min}分别为最大线电流和最小线电流。

(3) 三种电力类型的不平衡允差。表 1.4-13 给出了三种电力类型的电压、电流不平衡允差要求。

表 1.4-13 三种电力类型的电压、电流不平衡允差要求

电能质量	I 型	II 型	III 型
线电压不平衡允差	3%	3%	2%
电流不平衡允差	5%	5%	15%

3.1.2.5 暂态和瞬态电压 (Transient voltage)

(1) 瞬态电压允差 (voltage transient tolerance)。超过用电设备允差以外的电压突然变化 (不包括尖峰电压) 限值，以用电设备标称电压百分数表示。从扰动开始至规定的恢复时间，它恢复并保持在用电设备电压允差以内。瞬态电压允差不包括用电设备电压允差。式 (1.4-13) 给出了瞬态电压偏差的计算式

瞬态电压偏差(%)=
$$\frac{\text{瞬态电压}}{\text{用电设备标称电压}} \times 100\%$$
 (1.4-13)

(2) 瞬态电压恢复时间 (voltage transient recovery time)。从扰动开始至电压恢复到并保持在用电设备电压允差以内所经过的时间。

(3) 尖峰电压 (voltage spike)。时间持续很短的电压变化，基本的尖峰电压波形见图 1.4-18。

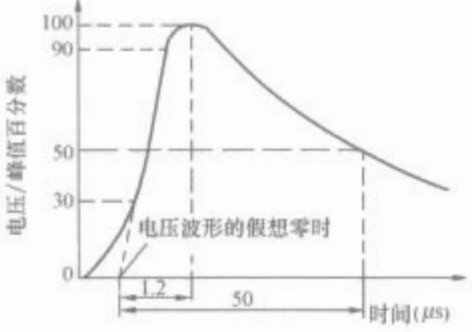


图 1.4-18 基本的尖峰电压波形

(4) 三种电力类型的暂态和瞬态电压要求。表 1.4-14 给出了三种电力类型的暂态和瞬态电压要求。

表 1.4-14 三种电力类型的暂态和瞬态电压要求

电能质量	I 型	II 型	III 型
瞬态电压：			
(1)瞬态电压允差	±6%	±16%	±5%
(2)瞬态电压恢复时间	2s	2s	0.25s

续表

电能质量	I 型	II 型	III 型
尖峰电压 (峰值)	2500V	2500V	2500V
	(对 380V 系统)	(对 380V 系统)	(对 380V 系统)
	1700V	1700V	1700V
	(对 220V 系统)	(对 220V 系统)	(对 220V 系统)
		1000V	1000V
		(对 115V 系统)	(对 115V 系统)

3.1.2.6 供电连续性 (Sustained power supply)

对由设备故障、模拟训练或操作失误等引起的短至 1ms 以内，长至数分钟的供电中断，应通过合理设置有限间断电源来消除其不利影响，以确保在各种不同工况下对重要用电设备的供电连续性和可靠性。有限间断电源应来自一块主配电板的正常电源、来自另一块主配电板的备用电源和/或来自一块应急配电板的应急电源以及电源故障自动检测装置和母线转换开关构成。当正常电源断电 (或正常电源和备用电源同时断电) 时，电源故障自动检测装置应能迅速反应，并通过母线转换开关以延时或瞬时转换的方法将所接用电设备转换至备用电源或应急电源。从正常电源转换至备用电源的转换时间一般应在 0.5~20s 的范围内。从正常电源或备用电源转换至应急电源的转换时间应在 10~30s 的范围内。对向大容量动力负载供电的特殊有限间断电源，最长转换时间不应超过 2min。在确保电力系统能够承受的前提下，应将实际的转换时间整定得尽可能短。表 1.4-15 给出了三种电力类型典型的断电时间规定。

表 1.4-15 三种电力类型典型的断电时间要求

电能质量	I 型	II 型	III 型
典型的断电时间	0.5~20s	0.5~20s	0.5~3s

3.1.2.7 浪涌电流 (Surge current)

浪涌电流是由用电设备起动或工作状态变化而引起的电流暂态变化，典型情况是电流在数毫秒内增至最大值，并在几毫秒至几分钟内衰减至额定值。

浪涌电流是在船舶电力系统中经常遇到的一种电能质量现象，其造成的影响很大，因此针对它提出了以下三条要求：

(1) 应尽量减少由于用电设备起动或工作状态变化而导致的浪涌电流的影响。

(2) 对于起动或工作状态变化不太频繁 (平均每天 10 次以下) 的用电设备，其最大浪涌电流所导致的界面电压跌落不应超过用电设备额定电压的 16% (对采用 I 型和 II 型电力的用电设备) 或 5% (对采用 III 型电力的用电设备)，且应采取措施以防止两个或多个这类用电设备同时起动或同时改变工作状态。

(3) 对于起动或工作状态变化较为频繁 (平均每天 10 次以上) 的用电设备，其最大浪涌电流所导致的界面电压跌落不应超过用电设备额定电压的 10% (对采用 I 型和 II 型电力的用电设备) 或 3.5% (对采用 III 型电力的用电设备)。

3.2 直流电力系统的电能质量要求

3.2.1 电力类型

(1) I 型电力。由充电发电机 (含兼作推进发电机的充电发电机) 向蓄电池充电并向全船负载供电，电压为幅压 430~640V 或 215~320V 及由蓄电池向全船负载供电，电压为幅压 350~440V 或 175~220V 的双绝缘不接地供电系

统提供Ⅰ型电力，该型电力适用于常规潜艇和核潜艇的应急动力。

(2) Ⅱ型电力。由整流装置供电，电压为24V的双绝缘不接地供电系统提供Ⅱ型电力，该电力适用于50Hz交流舰船。

(3) Ⅲ型电力。由蓄电池供电，电压为220V、110V、24V的双绝缘不接地供电系统提供Ⅲ型电力，该电力适用于50Hz交流舰船应急照明。

3.2.2 对电力系统的电能质量要求

表1.4-16总结了直流电力系统电能质量要求。

表 1.4-16 直流电力系统电能质量要求

序号	项 目	Ⅰ 型	Ⅱ 型	Ⅲ 型
1	用电设备标称电压	350~640V 或 175~320V	24V	220V、110V 或 24V
2	用电设备电压允差	—	±12%	±20%
3	系统纹波电压 ^①	4.5%	10%	—
4	瞬态电压： (a)瞬态电压允差 (b)瞬态电压恢复时间	±15% 1.5s	±16% 0.25s	—

续表

序号	项 目	Ⅰ 型	Ⅱ 型	Ⅲ 型
5	尖峰电压	2500V	600V	1700V (对于220V系统)； 1000V (对于110V系统)； 600V (对于24V系统)
6	典型断电时间	0.5~20s	—	—

① 纹波电压 ripple voltage 是指直流电压中的交流分量，以纹波电压的有效值与直流电压平均值的百分比表示。表中其他术语的定义与交流电力系统中对应术语的定义相同。

3.2.3 对用电设备的电能质量要求

(1) 纹波电压。用电设备引起的纹波电压不超过用电设备额定输入电压的2%。

(2) 纹波电流。对采用整流装置向直流推进电动机供电的系统应保证在各种规定工况下，流经推进电动机电枢的电流纹波系数不超过2%。

(3) 起动电流。一般用电设备的起动电流不超过用电设备额定电流的250%。

参考文献

- [1] 肖湘宁著. 电能质量分析与控制. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 董其国著. 电能质量技术问答. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [3] 马伟明. 船舶动力发展的方向——综合电力系统. 上海海运学院学报, 2004, (1): 1—11.
- [4] 孙诗南. 当今船舶电力推进装置发展新动向. 电气时代, 2002, (2).
- [5] 刘启. 前景灿烂的全电船舶. 舰载武器, 2003, (12).
- [6] 翼路明. 21 世纪美国海军水面船舶综合电力系统. 船舶技术, 1999, (3).
- [7] 钱志刚, 李亚旭编译. 美国海军用的综合电力系统. 船舶技术, 1999, (3).
- [8] 廖又明, 黎新. 电力推进船舶的发展与进步. 中外船舶科技, 2003, (4).
- [9] 汪美鸣译, 邓林校. 吊舱式电力推进系统综述. 国外船舶工程, 2003(2): 29—33.
- [10] 刘赞, 徐绍佐. 船舶综合电力推进系统综述. 柴油机, 2004, 2: 1—3.
- [11] 石艳, 徐惠明. 21 世纪综合全电力推进的航母. 船电技术, 2005, 2: 4—9.
- [12] 陈家金, 王和平. 船舶电力推进系统的发展. 世界海运, 2006, 8: 9—11.
- [13] 朱骏. 综合全电力推进系统未来船舶的发展方向. 中国造船, 2004, 12: 221—228.
- [14] 汪美鸣译, 张晓滨校. 直流分区配电系统——美国海军综合电力系统的基础(一). 国外船舶程, 2003, 5: 16—22.
- [15] 汪美鸣译, 张晓滨校. 直流分区配电系统——美国海军综合电力系统的基础(二). 国外船舶程, 2003, 6: 17—22.
- [16] 沈爱弟, 黄学武. 现代船舶电力推进中的几项关键技术. 航海技术, 2004, 1: 43—45.



第2篇 船舶电机与电器

主编单位：上海电器科学研究所(集团)有限公司

中国船级社上海分社

上海电缆所

泰州变压器厂

主 编：袁建敏 章定邦 马俊镛 朱伊文 曾纪纲 钱高芳

编写人员：袁建敏(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

章定邦(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

马俊镛(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

朱伊文(中国船级社上海分社)

曾纪纲(上海电缆所)

钱高芳(泰州变压器厂)

刘 丹(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

唐树本(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

张良基(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

陈永浩(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

施金武(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

陆 旻(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

庄火庚(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

沈海鹰(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

孙 戟(中国船级社上海分社)

陈信民(上海电缆所)

杭慧明(泰州变压器厂)

刘付海(泰州变压器厂)

第1章 船用电机

1 概述

1.1 用途

船用电机是船舶电工产品的一部分,范围为船用(含舰船、移动式 and 固定式近海装置)直流电机、同步电机、异步电机、中频发电机等,服务对象为海军舰船、远洋及近海船舶、内河船舶、渔船、近海及海上石油钻井平台等。

船用发电机与原动机(柴油机、汽轮机、燃气轮机)配套,构成船舶的主电站和应急电站,为船舶动力设备、照明设备、电热炊具等生活设施提供电源。船用电动机与风机、泵机、压缩机、起货机、锚机、系缆机及其他电动辅机设备配套,用于船上通风、给排水、消防、起货、起锚、系缆等,为船上工作人员和乘客提供必需的生活条件。电力推进电机则作为船舶主动力推进用。

1.2 简要发展历史

我国船用电机产品是从20世纪60年代初才逐步发展起来的,为了满足造船配套的需要,在全国陆用电机统一系列设计的基础上,先后自行派生设计和仿制了一批船用电机,如JO₂-H系列船用交流三相异步电动机、ZH和Z₂C系列船用直流电机、T₂H系列船用小型三相同步发电机、JZ-H系列船用起重用交流三相异步电动机等。

70年代,根据独立自主,自力更生的方针,船舶对配套电机产品的需求情况和性能要求,一方面补齐原有系列产品中所缺的规格;另一方面自行设计、试制完成了一批船用电机新产品,如Y-H系列船用三相异步电动机,YZ-H系列船用起重用三相异步电动机(单速、双速、三速),YHLQ-H系列船用起货机用恒转矩变极变速异步电动机,TFX-H系列和TFH系列及T₂S系列船用同步发电机,ZF₂H、ZD₂H系列船用中型直流电机,ZZY-H系列船用起重直流电动机,舰艇用幅压直流电动机,船用起货机用直流三输出发电机及执行电动机等。

80年代开始,我国实行改革开放政策,为提高我国船用电机产品的质量和性能,加快产品的更新换代,从国外陆续引进设备和制造技术,并逐步消化,实现国产化。引进的船用电机主要有德国西门子公司的IFC2、IFC5、IFC6系列,AEG公司的DKBH系列、英国PETBOW公司的FPE系列船用无刷同步发电机,西门子公司的IPB系列船用甲板机械配套起重和起货电动机。同时,开发研制成功TFW-H系列船用无刷同步发电机、YB-H系列船用隔爆型异步电动机等。

90年代开始,我国造船工业进一步发展,新型舰船陆续研制和建造,普遍增大了电站容量,要求配套电机产品扩大容量等级,降低噪声振动,提高电磁敏感度要求等,在此期间,国内开发研制完成JY-H系列舰用交流电动机、JYZC系列舰用低噪声三相异步电动机、SB-HT系列船用三次谐波励磁同步发电机。

到目前为止,船用电机约有36个系列、800多个规格。

在国内船舶和舰船上选用的主要电机产品有:TFW-H系列、SB-HW系列、ST₂系列船用无刷同步发电机,TFX-H系列、T₂H系列船用(相复励励磁)同步发电机和改进后的SB-HT、ST系列船用(三次谐波励磁)同步发电机,1FC系列和DKBH系列船(舰)用(无刷励磁)同步发电机。Y-H系列船用三相异步电动机,JY-H系列舰船用三相异步电动机,YZ-H系列和YPB-H系列船用起重用三相异步电动机,YT-H系列船用风机三相异步电动机,Z₂C系列、ZF₂H、ZD₂H系列船用直流电机,YB-H系列船用隔爆型三相异步电动机,ZYF系列舰艇用幅压直流电动机。

1.3 船用电机特点

船用电机产品的工作条件不同于陆用产品,其主要特点是:

(1) 气候环境条件。我国海域辽阔,气候复杂多样,大部分属温带和亚热带,最北部和南部属寒带和热带,船舶机舱温度比外界温度高,远洋航行船舶和舰艇的气候条件将更为恶劣。这样对船用电机的设计和结构来说,需要考虑高温、高湿、盐雾、油雾、霉菌等方面的影响因素。

(2) 机械环境条件。连续航行的船舶,需要考虑倾斜和摇摆的影响因素,还要考虑船舶自身产生的振动,海浪冲击的影响因素,对舰艇用产品,更要考虑作战时产生的二次强冲击、碰撞和颠簸(对快艇而言)等机械影响因素。

(3) 电磁兼容性。对于强电设备(如同步发电机、直流电机),要抑制其传导干扰和辐射干扰,对电子产品(如自动电压调整装置、电子调速装置等),还要考虑其抗干扰能力,从整体上讲是要考虑电磁兼容性。

(4) 可靠性和安全性。船舶是一个海上流动的场所,且活动空间很小,维修条件和维修能力比陆上差,要求船用电气设备具有高的可靠性和安全性。特别是作战舰艇,从其隐蔽性、机动性、提高作战能力考虑,特别强调产品的可靠性和安全性。

(5) 根据国际船电标准和船级社规范,对船用电机产品温升极值、电压和频率的变化、短路特性、电压调整率、并联运行指标、绝缘材料阻燃及滞燃要求等电气性能都作出了比陆用产品更高要求的规定。

1.4 船用电机产品的共同要求

根据船用电机特殊环境条件的要求,船舶电站容量的有限性,对于其绝缘材料、绝缘结构、绝缘工艺、外壳结构、结构材料、电镀工艺、涂漆工艺、电磁设计及防护型式等,都有较高和特殊的要求,完全从陆用电机派生设计有困难,不可能达到舰用、船用的要求。

1.4.1 环境空气温度

船用电机的环境空气温度为+45℃,水面舰船为+50℃,潜艇为+45℃,陆用电机的环境空气温度为+40℃。船用(舰用)电机规定的绕组温升限值较陆用电机低5~10K,因此,在电机电磁设计中,就必须考虑适当降低其热负荷。

1.4.2 盐雾

船用（舰用）电机受到盐雾的影响，舰船规定的盐雾浓度为 $2\sim 3\text{mg}/\text{m}^3$ 。电机外露金属电镀件和化学处理件（紧固件、导体、吊攀、铭牌等）经盐雾试验后，要求镀层的腐蚀程度符合表 2.1-1 的规定。因此舰（船）用电机外露金属电镀件的镀层厚度比陆用电机厚。

表 2.1-1 盐雾试验合格判据

底金属和镀层类别	试验持续时间 (h)	合格判据
钢 镀 锌	48	未出现白色、灰黑色、棕色等颜色的腐蚀产物
铜及铜合金镀镍铬	96	未出现灰白色或绿色的腐蚀产物
铜及铜合金镀镍	48	
铜及铜合金镀锡	48	未出现灰黑色的腐蚀产物
铝及铝合金阳极氧化	48	未出现灰色的腐蚀产物

1.4.3 霉菌

舰（船）用电机受到霉菌的影响，主要菌种有黑曲霉、土曲霉、宛氏拟青菌、绳状青菌、球毛壳菌、黄曲霉等。电机的绕组和绝缘件经 28d 长霉试验后，要求其长霉程度不超过规定值。因此，在绝缘工艺制定时，浸漆次数为 $2\sim 3$ 次，比陆用电机多一次，或在浸渍漆中适当添加防霉剂。

1.4.4 湿热

舰（船）用电机要求在 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 95% 的高温高湿条件下长期工作，必须具有耐潮性能，否则会引起绝缘电阻下降、表面生锈、油漆脱落等现象。船用电机经 55°C 、6d，舰用电机经 60°C 、5d 的交变湿热试验后，电机绕组对机壳和绕组间的绝缘电阻值，耐电压性能，金属电镀件和化学处理件的外观质量，电机表面漆的外观及附着力应符合有关规定。因此，要求电机的浸漆、电镀应严格按绝缘工艺执行，电机表面除锈清洗干净，腻子厚度要薄或不用腻子。

1.4.5 倾斜摇摆

船用电机、水面舰船用电机和潜艇用电机，应分别在表 2.1-2、表 2.1-3 和表 2.1-4 规定的倾斜摇摆条件下正常工作。经倾斜试验后轴承温度不应超过允许值，润滑油脂不应泄漏。

表 2.1-2 船用电机倾斜条件

横 倾	横 摇	纵 倾	纵 摇
15°	22.5°	5°	7.5°

注 可能同时发生横向和纵向倾斜。

表 2.1-3 水面舰船用电机倾斜条件

横 倾		纵 倾		横 摇		纵 摇	
角度	周期	角度	周期	角度	周期	角度	周期
$\pm 15^{\circ}$	—	$\pm 5^{\circ}/\pm 10^{\circ}$	—	$\pm 45^{\circ}$	$3\sim 14\text{s}$	$\pm 10^{\circ}$	$4\sim 10\text{s}$

表 2.1-4 潜艇用电机倾斜条件

航行状况	倾斜、摇摆	角度	周期
水上航行	横 倾	$\pm 15^{\circ}$	—
	纵 倾	$\pm 10^{\circ}$	—
	横 摇	$\pm 45^{\circ}/\pm 60^{\circ}$	$3\sim 14\text{s}$
	纵 摇	$\pm 15^{\circ}$	$4\sim 10\text{s}$

续表

航行状况	倾斜、摇摆	角度	周期
通气管航行	横 倾	$\pm 15^{\circ}$	—
	纵 倾	$\pm 10^{\circ}$	—
	横 摇	$\pm 30^{\circ}$	$3\sim 14\text{s}$
水下航行	横 倾	$\pm 15^{\circ}$	—
	纵 倾	$\pm 30^{\circ}$	—
	横 摇	$\pm 30^{\circ}$	$3\sim 14\text{s}$

1.4.6 振动

舰用电机应能承受舰船运行时，由主机和螺旋桨引起的船体振动，经振动试验后，应无机械损伤和紧固件松动，电压调整率仍能符合标准规定。振动试验参数按表 2.1-5 的规定。

表 2.1-5 振动试验参数

电机类型	频率范围 (Hz)	位移幅值 (mm)	加速度幅值 (m/s^2)
船用电机	$2^{+3}_{-0}\sim 13.2$	1	—
	$13.2\sim 100$	—	6.9
舰用电机	$1\sim 16$	1	—
	$16\sim 60$	—	10

1.4.7 冲击

船用电机会受到海浪对船体冲击的影响，舰用电机还应承受舰船自身武器发射、兵器命中船体和非接触爆炸所引起垂向、横向和纵向冲击影响。经冲击试验后，电机任何零部件不得断裂；任何部件不得出现明显的变形或错位；轴承温度不得超过规定值；稳态电压调整率应符合试验前的值（发电机）；对电动机而言，与试验前相比，转速不得相差 1% 以上，空载输入功率不得相差 5% 以上。

1.4.8 外壳防护

由于舰（船）用电机连续运行于船体倾斜、摇摆状态中，故对其外壳防护等级的要求也不同于陆用电机。船用（包括军辅船）电机的最低外壳防护等级为 IP22，其他还有 IP23、IP44、IP55、IP66，接线盒的防护等级与电机外壳防护等级一致，但不得低于 IP44。舰用电机最低的外壳防护等级为防滴式，其他还有防溅式、防水式、水密式和潜水式。与 IP 代码等级的对应关系应满足表 2.1-6 的规定。

表 2.1-6 外壳防护型式

防护型式	允许代用的最低 IP 等级
防滴式	IP23
防溅式	IP44
防水式	IP55 \sim IP57
水密式	IP58
潜水式	无

1.4.9 材料

1.4.9.1 外壳材料

船用电机的外壳材料应选用钢质材料或抗拉强度为 196MPa、抗弯强度为 392MPa 以上的铸铁材料（即 HT20-40）。舰用电机的外壳材料应选用钢质材料或抗拉强度为 420MPa、纵向延伸率为 18% 以上的球墨铸铁（即牌号为 QT400-18 或 QT400-18A）。

1.4.9.2 转轴材料

船用电机转轴材料的化学成分应选用抗拉强度为 441MPa 以上，屈服点为 211MPa 以上，纵向延伸率为 24%

以上的碳钢、碳锰钢。或采用抗拉强度为 650MPa，屈服点 450MPa，纵向延伸率 17% 以上的合金钢。

舰用电机转轴材料应选用抗拉强度 530MPa，屈服点 270MPa，纵向延伸率 21% 以上，含碳量不超过 0.35% 的低碳合金钢。

1.4.9.3 绝缘材料

船用、舰用电机的绝缘材料应选用滞燃、耐潮、耐霉、低毒的材料。移动和固定式近海装置用电机还应采用耐化学活质腐蚀的材料，结构绝缘件材料的相比漏电起痕指数应大于等于 175V。

1.4.9.4 金属零部件

船用、舰用电机金属零部件一般应选用耐腐蚀，或经防腐蚀处理过具有可靠腐蚀保护层的金属材料。

电机的铭牌、标识牌及外露的线路牌应采用黄铜或不锈钢制作，采用黄铜时其表面应进行镀铬套镍处理。

1.4.9.5 换向片材料

舰用直流电机换向片材料一般应采用硬铜或铜合金材料制作，各种材料的成分和性能应符合表 2.1-7 的规定。

表 2.1-7 换向片材料化学成分					
换向片材料	硬铜	银铜	铬铜	锆铜	稀土铜
化学成分 (%)	含铜 89.9	含银 0.07~0.02	含铬 0.4~0.6	含锆 0.2	含铜 0.1
抗拉强度 (MPa)	≥350	≥350	≥450	≥400	≥350
硬度 (HB)	≥80	≥95	≥110	≥120	≥95
电导率 (%IACS)	≥98	≥96	≥80	≥90	≥96
软化温度 (℃)	≥200	≥290	≥400	≥400	≥280
软化强度 (MPa)	≥200	≥250	≥210	≥350	—

1.4.9.6 禁用和限用材料

舰用电机不允许使用下列材料：

- (1) 毒性材料。
- (2) 易碎性材料。
- (3) 镁或镁合金材料。
- (4) 平衡块不允许用铅或铅锡合金材料。

1.4.10 表面防护要求

(1) 用碳钢或低碳合金钢制造的金属电镀件和化学处理件（如螺栓、螺钉、螺母、垫圈等紧固件和吊攀螺栓等）应进行镀锌钝化处理；对弹性零部件（如弹簧垫圈、弹簧等）应先作驱氢处理，再进行镀锌钝化处理。有特殊要求时，还可再涂覆一层清漆。

表 2.1-9 船用同步发电机系列参数汇总表																				
系列名称	频率 (Hz)	极数	功率 (kVA)	X_d	X'_d	X''_d	X_q	X'_q	X_2	X_0	T_n	T'_d	T''_d	T_{d0}	稳态短路					
				(标么值)	(标么值)	(标么值)	(标么值)	(标么值)	(标么值)	(标么值)	(s)	(s)	(s)	(s)	短路电流	维持时间 (s)				
* IFCb (F级) (隐极)	50 (400V)	4	26	3.1	0.10	0.067	2.35	0.08	0.135	0.031	0.01	0.023	0.001	—	3~5 I_n	5				
			~ 2000	~ 6.8	~ 0.247	~ 0.146	~ 5.1	~ 0.195	~ 0.259	~ 0.085	~ 0.03	~ 0.089	~ 0.005	—						
		6	240	3.1	0.153	0.083	2.7	0.095	0.16	0.046	0.015	0.044	0.001	—						
			~ 1750	~ 4.95	~ 0.202	~ 0.117	~ 3.75	~ 0.15	~ 0.223	~ 0.077	~ 0.021	~ 0.068	~ 0.004	—						
		8	430	3.35	0.18	0.095	2.5	0.13	0.174	0.052	0.019	0.07	—	0.003			—			
			~ 1500	~ 5.90	~ 0.277	~ 0.141	~ 4.45	~ 0.196	~ 0.234	~ 0.069	~ 0.029	~ 0.095	—	—						
		10	320	1.75	0.185	0.094	1.3	0.122	0.108	0.059	0.016	0.053	—	0.002			—			
			~ 1050	~ 3.75	~ 0.329	~ 0.135	~ 2.85	~ 0.168	~ 0.151	~ 0.06	~ 0.023	~ 0.084	—	—						

(2) 用铜或铜合金制造的电镀件和化学处理件（如铜质紧固件、铭牌、方向矢、导电连接片等）应进行镀镍、镀镍加铬、镀银处理。

(3) 用铝或铝合金制造的零部件应进行阳极氧化处理，处理后用重铬酸盐封闭。

2 船用同步发电机

船用同步发电机是船舶电站的核心组件，它的电气性能和结构的合理性及可靠性决定了船舶电力系统电能品质的好坏和使用适应性及安全性的优劣。由于海洋使用环境条件的特点和船舶用电负载的要求及海上安全的规定，故船用同步发电机比陆用电机的要求更高、更严。对于这些特殊要求，往往可以通过对电机结构合理设计及电磁参数综合考虑来争取达到。

2.1 船用同步发电机的定额

我国目前是世界上的造船大国，2005 年造船吨位已达到 1200 万吨。船东有国内的，但大多数是国外的，故船舶电网参数要满足各国船规要求，同时我国生产的船用发电机也应满足国际标准的要求。主要参数如下：

- 1) 额定频率：50Hz、60Hz。400Hz 特殊要求暂不考虑。
- 2) 额定电压：见表 2.1-8。

表 2.1-8 额 定 电 压 V					
相 别	频率 (Hz)	产 品 和 规 范			
		我 国 已 有 产 品		中 国 船 规 (2006)	
三相	50	390、400	3300、6300 ^①	390、400	3300、6600、11 000、15 000
	60	450 ^②	6600、10 500	450	—
单相	50	28、115、230		28、115、230	
	60				

① 可以提供相关船规要求额定电压的 60Hz 船用同步发电机。
② 具体产品见表 2.1-10。

3) 额定功率因数： $\cos\varphi=0.8$ （滞后）。若工作在钻井台上，向钻机的 SCR 装置供电，其功率因数为 $\cos\varphi=0.7$ （滞后）。因 SCR 装置是非线性负载，为了抑制谐波对设备影响，在相同有功输出情况下，增大发电机视在功率。

船用同步发电机系列参数见表 2.1-9。

续表

系列名称	频率 (Hz)	极数	功率 (kVA)	X_d (标么值)	X'_d (标么值)	X''_d (标么值)	X_q (标么值)	X'_q (标么值)	X_2 (标么值)	X_0 (标么值)	T_a (s)	T'_d (s)	T''_d (s)	T_{d0} (s)	稳态短路				
															短路电流	维持时间 (s)			
IFCb (F级) (隐极)	60 (450V)	4	31 ~ 2300	3.5 ~ 7.4	0.163 ~ 0.275	0.089 ~ 0.165	2.7 ~ 5.6	0.138 ~ 0.23	0.197 ~ 0.394	0.034 ~ 0.09	0.008 ~ 0.031	0.033 ~ 0.096	0.001 ~ 0.005	—	3~5 I_n	5			
		6	280 ~ 2100	3.45 ~ 5.6	0.174 ~ 0.231	0.092 ~ 0.131	2.65 ~ 4.25	0.113 ~ 0.169	0.181 ~ 0.256	0.051 ~ 0.097	0.015 ~ 0.024	0.047 ~ 0.071	0.001 ~ 0.004	—					
		8	520 ~ 1800	3.75 ~ 6.7	0.211 ~ 0.323	0.122 ~ 0.164	2.85 ~ 5.1	0.157 ~ 0.23	0.196 ~ 0.265	0.051 ~ 0.075	0.019 ~ 0.029	0.078 ~ 0.1	0.003 ~ —	—					
		10	365 ~ 1270	3.15 ~ 4.1	0.217 ~ 0.33	0.108 ~ 0.16	2.4 ~ 3.2	0.135 ~ 0.2	0.188 ~ 0.256	0.062 ~ 0.085	0.017 ~ 0.024	0.062 ~ 0.097	0.002 ~ 0.003	—					
MP、MX (F、H级) (凸极)	50 (400V)	4	12.5 ~ 1000	1.5 ~ 3.04	0.095 ~ 0.19	0.077 ~ 0.14	0.848 ~ 1.13	—	0.089 ~ 0.281	0.028 ~ 0.091	0.01 ~ 0.023	0.048 ~ 0.132	0.006 ~ 0.014	0.55 ~ 2.4	3 I_n	2			
	60 (450V)	4	12.5 ~ 1000	1.64 ~ 3.63	0.11 ~ 0.22	0.086 ~ 0.167	0.98 ~ 1.25	—	0.097 ~ 0.325	0.031 ~ 0.062	0.01 ~ 0.024	0.048 ~ 0.132	0.006 ~ 0.014	0.55 ~ 2.4					
DKBH (F级) (凸极)	50 (400V)	4	12 ~ 1250	2.04 ~ 5.19	0.108 ~ 0.266	0.081 ~ 0.162	0.878 ~ 2	0.091 ~ 0.172	—	—	0.003 2 ~ 0.028	0.039 ~ 0.256	0.014 ~ 0.017 4	0.55 ~ 5.48	3 I_n	3			
		6	190 ~ 910	2.18 ~ 3.53	0.168 ~ 0.256	0.106 ~ 0.168	0.847 ~ 1.4	0.108 ~ 0.175	—	—	0.009 8 ~ 0.019 8	0.12 ~ 0.235	0.005 7 ~ 0.015 5	1.38 ~ 4.02					
	60 (450V)	4	14.4 ~ 1500	2.32 ~ 5.90	0.123 ~ 0.303	0.092 ~ 0.184	0.906 ~ 2.28	0.105 ~ 0.195	—	—	0.003 2 ~ 0.028 6	0.039 ~ 0.256	0.001 4 ~ 0.017 4	0.55 ~ 5.48					
		6	228 ~ 990	2.45 ~ 4.01	0.191 ~ 0.292	0.12 ~ 0.192	0.963 ~ 1.59	0.123 ~ 0.199	—	—	0.010 ~ 0.020 4	0.12 ~ 0.235	0.005 7 ~ 0.015 5	1.38 ~ 4.02					
	LSG (H级) (凸极)	50 (400V)	4	35 ~ 1000	2.2 ~ 4.71	0.094 ~ 0.456	0.047 ~ 0.216	1.3 ~ 2.72	0.058 ~ 0.304	0.053 ~ 0.226	0.005 ~ 0.025	0.008 ~ 0.027	0.05 ~ 0.18	0.005 ~ 0.018			1.096 ~ 1.7	3 I_n	10
		60 (480V)	4	44 ~ 1250	2.3 ~ 4.76	0.095 ~ 0.451	0.047 ~ 0.236	1.4 ~ 2.83	0.059 ~ 0.319	0.053 ~ 0.226	0.005 ~ 0.025	0.008 ~ 0.027	0.05 ~ 0.18	0.005 ~ 0.018			1.096 ~ 1.7		

2.2 结构特点

可控励磁无刷发电机是目前船用同步发电机典型结构型式。但 20 世纪 70 年代我国统一设计的小型不可控相复励转场式发电机仍是目前国内沿海和内河小型船舶大量选用的产品。不管国内和国外，船用同步发电机多是从陆用产品派生的，基本结构相同。由于船用有其特殊要求，故有一些结构特点。

2.2.1 船用同步发电机需要多种极数

船用同步发电机有 2、4、6、8、10 极等品种，最常用的是 4 极和 8 极。对民用船舶和军辅船，主发电机是 8 极为主，而民船的应急发电机和军船主发电机是以 4 极为主。以 2005 年造船量为 1200 万吨计，平均每条船按 2 万吨平分，约造 600 多艘万吨船舶。又以每艘船舶装备三台主发电机，共约装备 1800 台 8 极主发电机，600 多台 4 极应急发电机。再加上内河、沿海船舶，军船及工程船需要，估计我国每年约有 5000 多台船用同步发电机需要量。但从表 2.1-10 可以看出，能提供 4、6、8 极发电机的只有 IFC6、IFC5 系列，其他系列主要是 4 极电机，可见缺口很大。

2.2.2 发电机外壳防护形式

船用同步发电机外壳分防滴式和防水式两种结构形式。

2.2.2.1 防滴式外壳

陆用和船用及舰用同步发电机防滴外壳区别于防滴角各有不同。从表 2.1-10 可以看出，舰用要求最严酷。

表 2.1-10 外壳防护形式

标准要求	防滴代号	防滴角
陆用标准	IP21	垂直角 (0°)
船规 (2006 年)	IP22	15°
舰规 GJB 4000—2000	防滴式	45°
	可用 IP23 代之	60°

船用和舰用防滴式发电机，其接线盒均采用不低于 IP44 结构，也可采用 IP54 规定。

2.2.2.2 防水式外壳

IP54 是防水式外壳代号在电机上方设置空气-水冷却器。冷却水可以是淡水或是海水。用风扇先将冷却空气经过定转子带走热量，再经过冷却水管把热空气冷却后回进入电机内部。通过水泵用冷却水把热空气的热量再带到电机外部。采用这种通风结构时，应考虑以下事项：

(1) IP54 是在 IP23 基础上设计的。应在空气-水冷却器损坏时，打开电机进出风口，可以恢复到 IP23 结构状态，并要求发电机额定输出基本不变。

(2) 空气-水冷却器置于电机上方。首先要防止冷却水管的水泄漏到电机内，尤其是带电部件上，故在电机内设置冷却水的渗漏报警装置。

(3) 冷却水管有单层管和双层管之分，最好选用双层管。由于管内流进的海水是有腐蚀性，故冷却水管要用耐腐

蚀材料制造，并应有防电化腐蚀措施。冷却水管要进行规定的密封性和强度试验，试验后不发生损坏和渗漏。

(4) 冷却海水进口温度应不高于 32℃，若高于 32℃，就影响发电机输出功率。

(5) 400kW 及以上发电机推荐采用 IP54 防水式外壳结构。

2.2.3 电机绝缘结构和相应保护措施

船用电机由于使用环境的三防（湿热、盐雾、霉菌）要求，其绝缘结构要求应比陆用电机要高。目前国内外船用同步发电机可以选用 B、F、H 级甚至更高级耐热的绝缘结构。船用同步发电机绝缘结构和处理方式推荐如下：

(1) 船用电机可采用真空压力浸漆或沉浸工艺，但要求必须经过二次浸漆绝缘处理。浸漆过程要严格按绝缘漆所要求的绝缘工艺进行。

(2) 为提高电机绝缘耐潮性能，电机内可装防冷凝加热器。对大容量电机，更应予以考虑。其原则是当电机不运转时，加热器通电（一般为单相 220V 或 110V 电源供应）使电机内空气温度高于发电机所处环境温度约 5K 即可。加热器的功率由电机体积的大小来决定，IFC6 的规定可供参考，见表 2.1-11。

表 2.1-11 加热器功率选择

发电机功率 (kVA)	加热器功率 (W)
26~230	80
240~700	150
800~2000	315
2000 以上	630

2.2.4 阻尼绕组

船用同步发电机要求具有良好的全阻尼绕组，阻尼绕组主要有以下作用：

(1) 有利于并联运行。尤其是采用粗同步并车时，阻尼绕组能起到加速牵入同步的作用。

(2) 增强承担不平衡负载的能力。因不平衡负载电流能形成一个椭圆形逆旋磁场，与转子上阻尼绕组有 2f 相对运动，阻尼绕组中会感应出 2f 电流，能起到削弱不平衡负载造成的不良后果。如减少三相电压偏差值，减小电机的振动，减少产生的附加损耗。例如有单位曾对 75kW 发电机进行试验，先不设阻尼笼，后加设阻尼笼，使三相电压偏差值由 4% 减少到 1%，效果十分明显。

(3) 可以抑制瞬时过电压。

(4) 可以减小瞬态电压调整率，但也相应增大了短路电流值。

(5) 适当选择阻尼槽（孔）数和槽距，有利改善发电机电压波形。

2.2.5 轴承选择和防止轴电流产生的措施

船用同步发电机轴承，有滚动轴承和滑动轴承二种。滚动轴承由封闭轴承和非封闭轴承。DKBH 和 MP 与 MX 全系列均用全封闭轴承。全封闭轴承特点是性能好，噪声小，使用方便，寿命长。对船用环境条件特别适合。几百千瓦的电机常采用较大功率发电机仍用加润滑脂滚动轴承或滑动轴承，但应设计合理的、使用方便的加油脂和排废油脂装置。

防止轴电流产生这是船用同步发电机结构设计时特别注意的事项。一般采用测轴电压峰值，若不超过 1V，可以不采取措施。当超过 1V 时，则要采取措施。MIL-G-3124 (D) 对其作了简单描述和规定，即电机在设计时，选择每极定子槽数和圆周扇形片数时应尽可能减少磁路不对称，在

轴内感应轴电压。对 500kW 及以上发电机，轴承和轴承室应加以绝缘，相应与轴承连接的金属管和其他导电连接件均应电气绝缘。

对采用扇形片或机座为分离式电机时，在设计和制造时，要充分考虑减少轴电流的产生。如定子扇形片数及重叠数要满足式 (2.1-1)，才符合无轴电流条件。实质上是要求在转子每转一个极距后，在每极下的齿部和轭部的磁阻基本均衡，不会产生脉振磁通现象。分离式定子的接缝尽量减小，使脉振磁通降到最小限度

$$2nt/p = \text{偶数或带偶数分子的最简分数} \quad (2.1-1)$$

式中：t 为扇形片数；n 为重叠数；p 为极数。

交流电机轴电压的检测应按 GB/T 1029—2005《同步电机试验方法》进行直流电机轴电压的检测应按 GB/T 1311《直流电机试验方法》进行。

2.3 励磁方式

船用同步发电机励磁方式主要有三种：不可控相复励、可控相复励及可控无刷励磁。

(1) T2H 和 TFH 系列主要采用电流复合型不可控相复励系统。陆用产品的稳态电压调整率要求为 3%，而船用则要求为 2.5%。从自控观点分析，这种励磁系统为扰动调节。随负载变化时具有一定稳压功能，但其稳态调压精度不高，而动态特性非常好。

(2) 可控相复励系统很少与有刷船用同步发电机配套使用，但已成功用在可控无刷励磁发电机上，如 IFC5、IFC6 系列即采用该种励磁方式，如图 2.1-1 所示。该相复励系统是采用谐振式磁复合原理，因有电流互感器提供的负载电流反馈量和端电压检测出电压差信号，从自控观点分析，它是差动和扰动双重调节。这种励磁系统静态和动态性能都很优良。

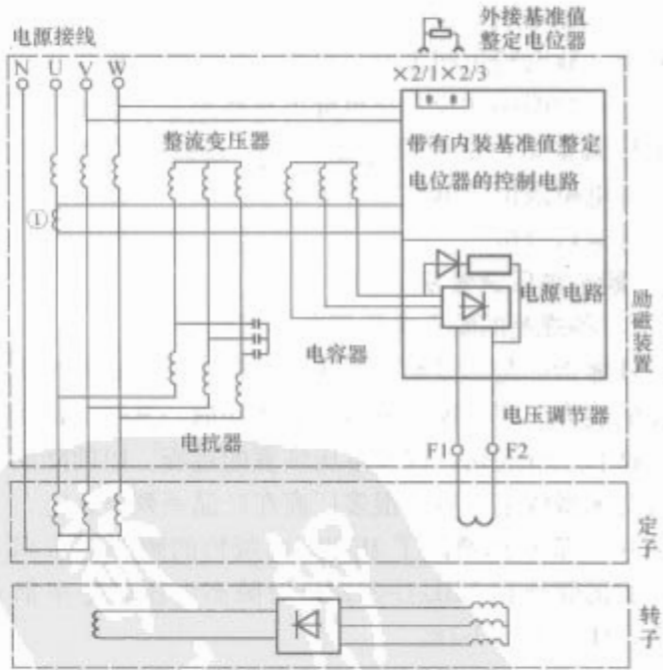


图 2.1-1 可控相复励无刷励磁系统

(3) 具有永磁辅助励磁机的可控无刷励磁系统。该系统由永磁励磁机提供一个恒定励磁功率，同时由主电机辅助绕组提供另一个励磁能量。它属于差动调节系统，并保证发电机在出线端短路时仍有励磁能量励磁。MP、MX 和 BCM、UC、HC，以及 LSG 系列均采用该种励磁方式，如图 2.1-2 所示。DKBH 系列则采用主发电机磁场分路的辅助励磁机，也可以达到同等功效。

以上几种励磁方式一个共同特点，即在电机短路时会提

供一定励磁能量，保证能维持一定数量的短路电流。当短路故障消除后，仍可以自激发电，恢复正常工作。这是船舶电网选择性保护和运行可靠性所提出的特别要求。

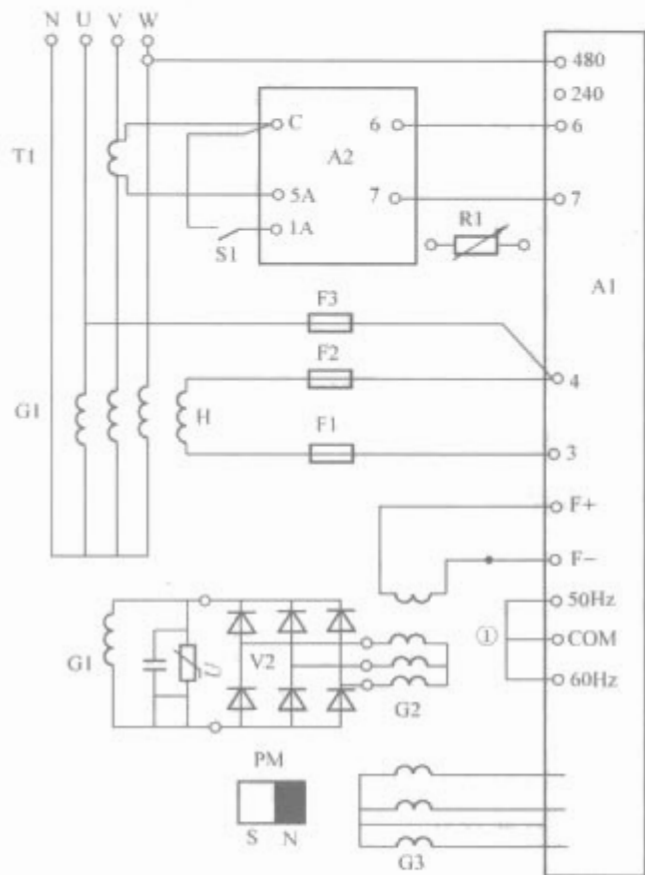


图 2.1-2 带永磁辅助励磁机的可控无刷励磁系统

2.4 电气性能特殊要求

由于船舶电网容量有限，系统保护要求及船舶上负载的使用特点，故对船用同步发电机的一些性能指标提出比较高的要求，对舰船用同步发电机提出更高要求。这主要反映在瞬态电压调整率，发电机电压波形、过载、短路、并联运行、绝缘电阻限值及电磁兼容等诸多方面。下面着重对四个性能指标进行分析。

2.4.1 瞬态电压调整率

2.4.1.1 各规范的瞬态电压调整率指标对比

该性能指标是衡量船用同步发电机及其励磁系统承受负载突变的能力。它表现在突然负载扰动后，其发电机端电压出现下跌和上升变化，以及电压恢复的过程。以前陆用电机标准对此未做规定，后来很多厂商在产品系列设计时，考虑船陆通用，基本都增添了 IEC92 出版物的瞬态电压调整率指标。我国舰规和 MIL-G-3124D 对瞬态电压调整率都有明确规定，详见表 2.1-12。

表 2.1-12 瞬态电压调整率汇总表			
标准类别	突变负载	电压变化 (%)	恢复时间 (s)
IEC 60092-301	0→60% (cosφ≤0.4)	-15	1.5
	60%→0 (cosφ≤0.4)	+20	
GJB-75A-1997	0→50% (cosφ≤0.4)	-13	1
MIL-G-3124 D	0→50% (cosφ≤0.4)	-14①	—

① 在距发电机 635cm (25ft) 的配电处测得数值。

2.4.1.2 超瞬变电抗

超瞬变电抗 X''_d 和瞬变电抗 X'_d 对瞬态电压调整率的影响从表 2.1-13 可以看出，军用和民用船舶对瞬态电压调整率要求稍有差距。瞬态电压突然变化数值是由发电机设计的 X'_d 和 X''_d 的大小所决定。而电压恢复时间则取决于励磁系统对瞬变的响应速度。从自控观点来看，适当的超调，有助于缩短电压恢复时间。如图 2.1-3 所示，这是一个典型发电机突加负载的过渡过程示波图，它就具有一定超调量。在二阶系统中，经一次超调振荡后，而进入电压稳定区域内。从图 2.1-3 中，还可以发现电压跌落最低值是在突加负载时刻之后半个周波到一个周波之间，这时发电机的端电压跌落至最低值时瞬变电抗值 X_{dT} 介于 X''_d 和 X'_d 之间。很多文献推荐 X_{dT} 取为 X''_d 和 X'_d 的平均值。 X_{dT} 代入式 (2.1-2) 可计算电压跌落的百分值

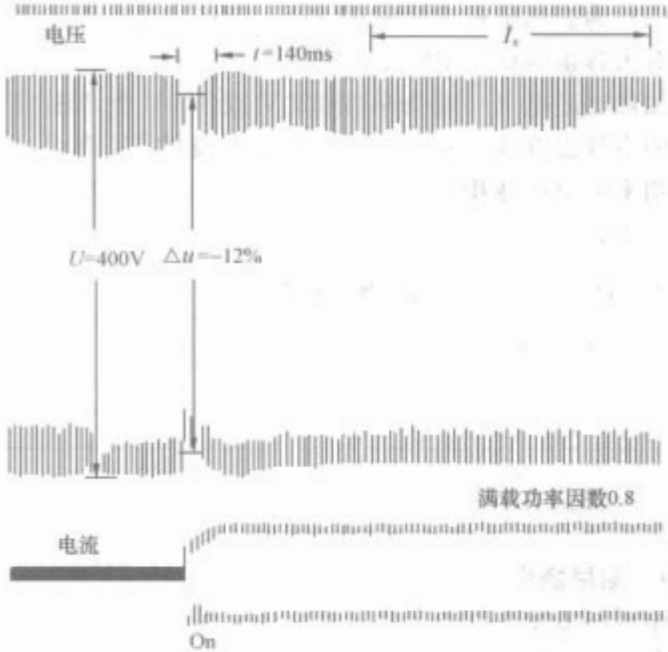


图 2.1-3 突加负载时端电压变化示波图

$$\Delta U = [X_{dt} / (X_{dt} + X_L)] \times 100\% \quad (2.1-2)$$

式中： ΔU 为电压跌落值； X_{dt} 为突加负载时刻电机的瞬变电抗（标么值）； X_L 为负载阻抗（标么值）。

X_L 按式 (2.1-3) 计算

$$X_L = 1 / I_{dy} \quad (2.1-3)$$

式中： I_{dy} 为负载突加时电流初始值（标么值）。

按式 (2.1-2) 可计算出按各标准规定瞬态电压调整率换算出相应的最大 X_{dt} 值，见表 2.1-13。

表 2.1-13 按各标准规定瞬态电压调整率换算出相应的最大 X_{dt} 值	
标准类别	X_{dt}
IEC 60092—301	0.294
GJB 75A—1997	0.298 8
MIL-G-3124 D (1990 年版)	0.326
MIL-G-3124 C (1955 年版)	0.298 8

在电机设计时，就要控制 X'_d 和 X''_d 的设计值大小。GJB-75A 和 MIL-G-3124 D 标准中列出了 X'_d 和 X''_d 的推荐值，见表 2.1-14。表中值比表 2.1-13 换算值要小。但考虑电机制造工艺和测试参数时合闸相角及图测分析等因素，应给瞬态特性放有一定裕量。

表 2.1-14 X'_d 和 X''_d 推荐值

标准类别	X'_d	X''_d	取 $X_{d\Gamma}$ 最大值
GJB 75A—1997	0.20	0.13~0.16	0.18
MIL-G-3124D(1990 年版)	0.20	0.13~0.16	0.18
MIL-G-3124C(1955 年版)	0.17~0.21	0.1~0.132	0.171

在进行舰用同步发电机设计时，应遵守规范要求，尽量使 X'_d 和 X''_d 小于规范的规定值，以确保瞬态性能要求。

常用的船用同步发电机系列 X'_d 和 X''_d 及 $X_{d\Gamma}$ 数值列于表 2.1-15 中。

从表 2.1-15 中，可以看出大多数系列的 X'_d 和 X''_d 能满足瞬变特性要求，只有 LSG 系列中有若干规格电机 X'_d 和 X''_d 偏大，难满足瞬时特性的规定。

表 2.1-15 X'_d 和 X''_d 及 $X_{d\Gamma}$ 最大值

序号	系列名称	频率 (Hz)	极数	功率范围 (kVA)	X'_d	X''_d	$X_{d\Gamma\max}$
					%		
1	IFC6	50	4	26~2500	10.6~24.7	6.7~14.6	19.65
			6	240~2200	15.3~21.2	8.9~11.7	13.7
			8	670~1500	18~27.7	10.4~14.1	20.9
		60	4	31~3000	16.2~26.7	10~15.6	21.15
			6	280~2640	17.4~24.2	9.2~13.3	18.75
			8	820~1800	21.1~32.3	12.2~16.4	24.35
2	MP MX	50	4	41~752	9.5~19	8.3~14.4	16.7
		60	4	56~1219	9.6~22	6.58~16.7	19.35
3	DKBH	50	4	12~1250	12.6~26.6	8.1~16.2	21.4
			6	190~910	15.5~25.6	10.5~16.8	21.2
		60	4	14.4~1500	12.3~30.3	9.2~18.4	24.35
			6	228~1090	17.6~29.2	11.9~19.2	24.2
4	LSG	50	4	35~1000	9.4~43.3	4.7~21.6	32.45
		60	4	44~1145	9.5~45.1	4.7~22.5	33.55

2.4.1.3 设计时 X'_d 和 X''_d 等参数的控制

船用同步发电机在设计中，要控制好 X'_d 和 X''_d 数值范围。发电机在超瞬变过程中，电机阻抗 (X''_d) 等效电路如图 2.1-4 所示。

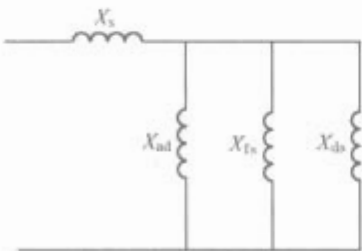


图 2.1-4 发电机超瞬变阻抗等效电路图

X''_d 是由定子漏抗 X_s 与直流电枢反应电抗 X_{ad} 、励磁绕组漏抗 X_{fs} 、阻尼绕组直轴电抗 X_{ds} 并联后再串联。根据很多电机算例分析， X_s 约占 X'_d 的 60% 左右。后项并联阻抗中， X_{ds} 起决定性作用。对 X'_d 而言， X_{fs} 又起主要作用。在发电机设计中，当气隙磁密 B 和定子电密 A 以及电机尺寸初步决定后，就要计算，并控制 X_s 、 X_{fs} 和 X_{ds} 数值范围。

(1) 首先进行稳态特性计算，把 X_s 值控制在 X'_d 的 60% 左右。

(2) 控制 X_{fs} 数值时，就要合理选择磁极极身、极靴及转子线圈匝数等。

(3) 要控制 X_{ds} 数值，就要选择恰当的阻尼槽及端环尺寸，阻尼条极数、跨距和材料。

2.4.2 短路特性

2.4.2.1 船用同步发电机短路特性的理由及具体指标

由于船舶电网选择性保护和使用寿命要求，对发电机和励磁系统提出了稳态短路指标，见表 2.1-16。

表 2.1-16 稳态短路指标

规范类别	短路状态	短路电流倍数	维持时间 t (s)	短路后要求
中国船规	三相	$3I_N$	2	不损坏
GJB 4000 GLB 75A	三相和 相间	$3.2I_N$	17.58①	不损坏， 当短路故障切除后， 应能恢复正常工作

① 按 $I^2t=180$ 公式计算 t 数值，其中将 $I=3.2$ 代入进行计算。

陆用发电机未提出具体短路电流倍数限值，仅提出三相短路，维持 3s 后，发电机及励磁系统应不损坏。该指标舰用比船用要求要严酷。舰用同步发电机不仅要考核三相短路，还要求二相短路。短路电流倍数虽相差不大，但维持时间舰用发电机比船用发电机要求长得多。图 2.1-5 为船用同步发电机短路时电流过渡过程典型示波图。

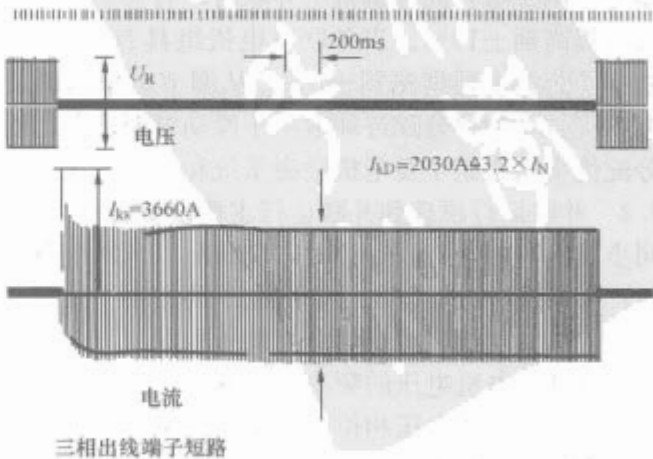


图 2.1-5 短路电流变化示波图

2.4.2.2 考虑短路指标时，发电机和其励磁系统的设计要点

为了使发电机及其励磁系统能达到不小于3倍额定电流的短路电流，应从其励磁系统方面来解决。从控制原理来讲，可分两类：

(1) 励磁系统应具有一定的复励分量，即有一定的电流正反馈功能。当发电机短路时，端电压为零，来自电压源供给的励磁分量也为零，但来自电流源供给的励磁分量和电流值成正比，由它对发电机继续励磁，产生能维持短路电流的内电动势。

(2) 当发电机带有一个永磁辅助励磁机，不管发电机是工作或短路状态，它始终能给发电机提供一个恒定的激励能量。再有辅助绕组电压源提供一个激励能量，它不受主绕组短路影响，它也能满足该特性要求。

发电机要做到能承受如此大的稳态短路电流造成的热应力和机械应力而不损坏，特别要求电机线圈浸漆要浸透、烘干，端部绑扎牢固，甚至可以采用转子端部护环结构，尽量使之成为一个牢固的整体。

2.4.3 并联运行

2.4.3.1 船规和舰规中并联运行指标对比

船舶电网的特点是孤立的小电网，由于各种工况的不同要求，并联操作比较频繁。由于船舶是远离岸线，故船用同步发电机并联运行的安全性和可靠性更加显得重要。船规和舰规均对该性能提出具体指标和要求，见表2.1-17。

表 2.1-17 并联运行规定						
规范类别	负载范围/并联电机总额定功率(%)	功率因数	有无调频装置	并联发电机组型号、规格、容量是否要求相同	有功功率分配差度(%)	无功功率分配差度(%)
船规 (2006年)	20~100	0.8 (滞后)	不特指	可不同	$\pm 15^{\text{①}}$ $\pm 25^{\text{②}}$	$\pm 10^{\text{①}}$ $\pm 25^{\text{②}}$
舰规 GJB4000	20~100	0.6~0.9 (滞后)	不特指	相同	± 10	± 10
				可不同	$\pm 15^{\text{①}}$ $\pm 25^{\text{②}}$	$\pm 10^{\text{①}}$ $\pm 25^{\text{②}}$
			有	相同	± 5	± 10
				可不同	± 10	± 10

① 指不同容量发电机组并联时，有功功率或无功功率分配差度应不超过最大机组的额定有功功率或无功功率百分比。
② 指不同容量发电机组并联时，有功功率或无功功率分配差度应不超过最小机组的额定有功功率或无功功率百分比。

从表2.1-17可以看出，舰用要求高于船用。首先是负载功率因数从0.6~0.9(滞后)都应满足规定要求。另外对同型号、同规格和同容量机组并联时，有功功率分配差度由 $\pm 15\%$ 提高到 $\pm 10\%$ 。当并联发电机组具有调频装置时，有功功率分配差度再提高到 $\pm 5\%$ 。从调节对象和调节装置功能来讲，有功功率分配好坏取决于原动机调速器，而无功功率分配优劣则决定于发电机励磁系统和自动电压调节器。

2.4.3.2 并联运行原理和并联运行主要设备简介

- 同步发电机进行并联运行时，应满足以下四个条件：
- (1) 待并发电机端电压与电网电压的相序一致。
 - (2) 待并发电机端电压与电网电压相同。
 - (3) 待并发电机电压的频率与电网电压的频率相同。
 - (4) 待并发电机电压相位与电网电压相位一致。
- 第一个条件是必须满足，第二、第三个条件只要接近，

这是考虑到待并电机并联成功后，由于带载，其转速和电压都有一定跌落。通常待并电机的电压比运行电机电压调高1%~2%（可视其稳态电压调整率大小来选定）。同样频率也可调高0.5Hz。一旦二机并联完成，牵入同步后，电网会出现平衡后的一个新的电压和频率值（这应在规定额定值的附近）。当采用手动并联时，上述第四个条件只要保持接近即可。若应用电抗器粗同步并联时，两个电压相角差可以很大。理论计算，相位差为 180° 时，电抗器能限流在1.2~1.4倍额定电流值，这时并联也不会损坏电机。上述后三个条件的不一致性大小，都反映到会在两个发电机同相输出端之间形成一个电压差，它会造成一个环流，它是无功性平衡电流，有助于待并发电机牵入同步。但电压差不能太大，否则，环流很大，反而增加功率振荡，开关跳闸，使并联失败。

要实现并联运行，应配置必要的并联运行装置，以检查并联之前是否满足上述并联条件。若满足，即可以手动操作或自动投入并联运行。船舶上通常采用以下并联方式：

- (1) 手动准同步并联。
- (2) 电抗器粗同步并联。
- (3) 自动准同步并联。

手动准同步并联的并联装置简单，易操作，适合小型内河、沿海和非自动化船舶。除去每台发电机的配电板上正常配置之外，增加一组指示灯或再配一块同步表即可。一组指示灯可按图2.1-6或图2.1-7接成灯光明暗法或灯光旋转法线路来监视待并发电机组与电网的电压差及频率差。灯光明暗法是将三个灯接到电网与待并发电机的同相端部上。灯亮表示电压差存在，灯暗表示电压差为零。还利用灯明暗速度来判断频差大小。明暗速度快，表示频差大，明暗速度缓慢，表示频差小。所以手动操作者除监视配电板上仪表显示之外，主要观察灯光变化。应在灯光明暗变化缓慢时，一当灯光快变暗瞬间，合上并联开关。不要等灯全暗再合闸，因为开关动作时间还有几十毫秒，所以要适当提前操作。灯光旋转法是将一只灯同相相接，另两只灯异相相接。当 $f_j > f_{dw}$ 时，三灯按HL1→HL2→HL3→HL1依次明亮的旋转。当 $f_j < f_{dw}$ 时，则反向。应捕捉灯光旋转速度在每转一圈为3~5s时，HL1全灭，HL2和HL3同样亮时，表示满足并联后三个条件，可以瞬刻操作并联开关合闸。同样也要掌握一个提前量。有的船舶同时装有同步表，更能直观反映并联时是否满足并联条件。

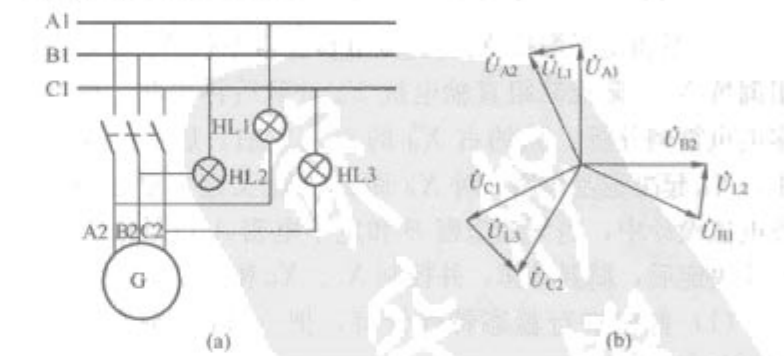


图 2.1-6 灯光明暗法
(a) 接线图；(b) 电压相量图

手动准同步并联对操作要求较高，如操作不当，往往会产生较大的冲击电流，影响并联成功率。为了减小由于并联条件不满足而造成过大的冲击电流，有些船舶上采用电抗器粗同步并联方式，如图2.1-8所示。这种并联方法多用在不可控相复励发电机并联，但也可以用于其他小型的、自动化船舶上，它特点是操作方便。因并联时先经过接触器，通过

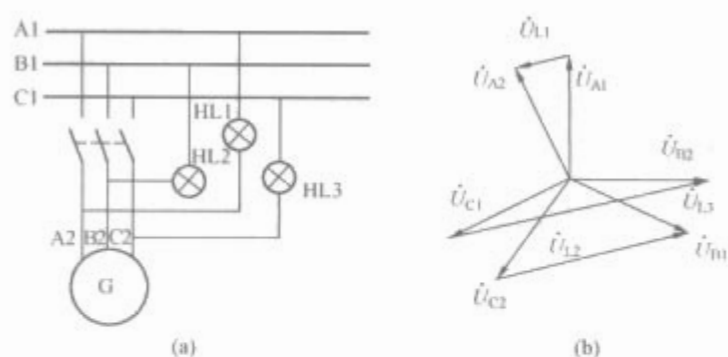


图 2.1-7 灯光旋转法

(a) 接线图; (b) 电压相量图

电抗器把待并发电机接到电网上。电抗器把最严酷的 180° 相位差产生的冲击电流抑制在 $1.2 \sim 1.4$ 倍额定电流以下。故通过这种方式, 并联时不刻意要求完全满足并联的后面三个条件。当电机已牵入同步后, 可接通 S 开关, 再断开 KM。往往在实行这种并联方式时, 也装置指示灯, 甚至同步表, 所以这两种并联方法有时互用。

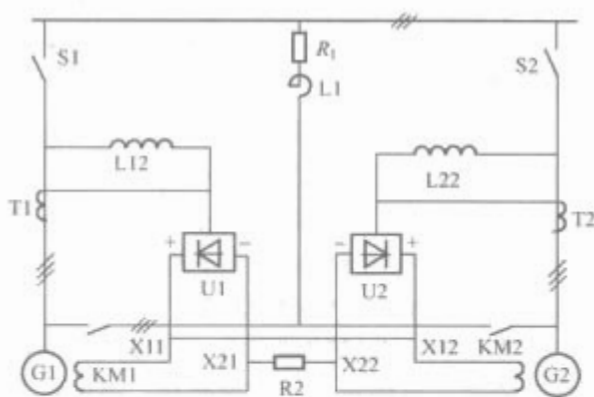


图 2.1-8 不可控相复励发电机电

抗器粗同步并联原理图

对要求高或自动化船舶, 则应选用自动准同步并联方法, 同时要装置一套自动并联装置, 如图 2.1-9 所示。该装置基本功能如下:

(1) 可检测出待并机组电压和电网电压的频率差值大小和频差符号是正或负, 根据这些信息向待并机组原动机发出减速或加速的自整步信号。

(2) 自动检测出电压差、频率差、相位差的数值, 当满足并联的允许值范围内, 适时地发出并联合闸指令。

从上述功能来看, 发电机组的原动机应配置可控的自动调速器, 发电机应为带有自动电压调节器的可控励磁系统。

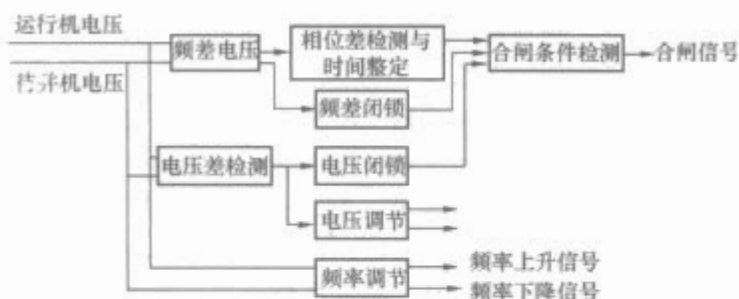


图 2.1-9 自动并联装置原理框图

2.4.3.3 发电机及励磁系统和原动机调速系统在设计和选型时应注意的问题

使发电机组并联运行顺利、可靠, 在设计和选型时应注意以下问题:

(1) 发电机应有良好的全阻尼笼系统, 可以方便并联时牵入同步, 并减少并联振荡现象。

(2) 不可控相复励发电机并联时, 常采用加直流均压线

(见图 2.1-9) 或交流均压线方法。人为把 2 台发电机的励磁电压拉平。若励磁电压稍有不同, 在均压线的串电阻上由均衡环流产生的电压差来补偿。故设计并联不可控相复励发电机时, 励磁电压应尽量一致。

(3) 采取手动并联时, 发电机励磁和原动机调速器应设置手动调节旋钮。通常在二机并联同步后, 为了调节有功功率分配时, 可以同时反向调节二个原动机调速器。若调节无功功率分配时, 可以同时反向调节二个发电机的激励。

(4) 带自动电压调节器可控励磁发电机的励磁装置, 应设置调差装置。在单机运行时, 该装置切除, 此时稳态电压调整率很高, 可以达到 $\pm 0.5\% \sim \pm 1\%$, 当二机并联运行时, 调差装置一旦接入, 使发电机电压出现下垂特性。即将稳态电压调整率变大, 通常调在 $\pm 2.5\% \sim \pm 4\%$ 之间, 以便于二机稳定并联运行。在图 2.1-1 中用电流互感器①把调差接入。图 2.1-2 中通过 T2 电流互感器把调差接入。要切除调差装置, 即把该电流互感器短路。

(5) 采用自动并联装置时, 要选用带自动电压调节器的可控励磁发电机和带自动转速调节器及自动伺服控制系统的转速调节装置。

(6) 电抗器粗同步并联所用的电抗器为空心电抗器。按 180° 相角差, 其电压差为 2 倍额定相电压 (即 $2 \times 230V = 460V$) 计算环流值, 应控制在 $1.2 \sim 1.4$ 倍额定电流左右。

2.4.4 同步发电机电压波形

2.4.4.1 对各规范及若干同步发电机系列的电压波形指标分析

在表 2.1-18 中分别列出船规、舰规, MIL 标准及若干同步发电机系列对电压波形提出的指标。

表 2.1-18 电压波形指标

规范和发电机系列名称	电压波形畸变率 (%)	电话谐波系数 (THF) (%)	电话干扰因数 (TIF)	总谐波含量 (%)	单次谐波含量 (%)	偏离系数 (%)
船规 (2006 年)	5①	—	—	—	—	—
舰规 (GJB 4000—2000)②	4	—	—	—	2	5
MIL-G-3124D(1990 版)	—	—	—	1	0.3	5
LSG 系列	3	4	50	—	—	—
UC、HC 系列	—	2	50	—	—	—
MP、MX 系列	5	—	—	—	—	5
GJB75A—97	4	—	—	—	2	5

① 对 24kW 以下发电机可取较大值。

② 在发电机空载到满载情况下, 均应符合规定。

从表 2.1-18 中的数据对比, 可以看出:

(1) 船规和若干船用同步发电机系列对电压波形主要规定了电压波形畸变率指标。同时一些陆用发电机系列还给出了电压波形的电话谐波系数 (THF) 及电话干扰因数 (TIF) 另外二个指标。在船舶上, 由于通信线路的敷设和屏蔽措施合理设置, 电源线路对通信线路干扰不是主要矛盾, 再加上船舶设备要进行电磁兼容考核, 其考核频带覆盖了 THF 所要求的 $16.68 \sim 5000\text{Hz}$ 频带。

(2) 舰规和舰用同步发电机标准中除有电压波形畸变率指标外, 还提出了最大单次谐波含量及电压偏离系数二项指标。电压波形畸变率指标也略高于船用要求。

(3) MIL 标准对电压波形提出了总谐波含量、最大单次谐波含量及电压偏离系数三个指标。它远高于我国舰规要求。

按定义,电压总谐波含量 K_0 和电压波形畸变率 K_n 可用下式计算

$$K_0 = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \cdots + U_n^2} / U \times 100\% \quad (2.1-4)$$

$$K_n = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \cdots + U_n^2} / U_1 \times 100\% \quad (2.1-5)$$

上两式中: U_2 、 U_3 、 U_4 、 \cdots 、 U_n 为各次谐波电压有效值, V ; U 为电压有效值, V ; U_1 为基波电压有效值, V 。

MIL 标准规定总谐波含量不大于 1, 单次谐波含量不大于 0.3, 它们远比我国舰用要求要高。对电压波形要求高有以下好处:

- 1) 有利于电气设备电磁兼容达标。
- 2) 对电压波形要求高的设备, 可直接由主电网供电, 省去一些专用供电发电机组。

2.4.4.2 电压波形畸变产生原因和改善措施

电压波形畸变带来很多害处, 这里仅扼要汇总, 并针对船用特点补充说明。

(1) 电压波形产生畸变的原因大致有以下几点:

1) 凸极转子极弧形状和隐极励磁绕组分布不当, 造成空载磁动势波形非正弦性, 产生了较多谐波分量, 这些谐波是一系列奇次谐波。

2) 定子的齿槽效应产生谐波。由于定子开槽后, 引起气隙磁导不均匀, 对转子的磁动势起调制作用, 从而使气隙基波磁密幅值产生脉振, 即在基波磁动势上叠加一个频率为 $(Z/p \pm 1)f$ 的齿谐波, Z/p 为发电机每极齿数。

3) 定子电枢绕组分布和跨距不同, 影响到在绕组中感应电动势波形正弦性要求。

4) 大量非线性用电负载, 会使发电机端电压产生畸变。

(2) 改善电压波形措施如下:

1) 凸极电机气隙采用不等气隙, 隐机电极励磁绕组按气隙正弦磁动势波要求分布。总之应使发电机空载时气隙磁动势波形接近正弦波, 尽量减小谐波分量。

2) 定子开槽是不可避免的, 但能用闭口槽就不要用开口或半开口槽。对必须用开口槽者, 用磁性槽楔也可以减少齿谐波。另外采用斜槽方法是减少齿谐波的有效手段。往往放大气隙也可减小齿谐波, 但其代价是增加电机制造成本。

3) 定子绕组选择恰当的分布系数和短距系数, 可有效削弱某些频次的电压谐波量。

4) 当电机每极每相槽数 q 较小时, 采用分数槽绕组是改善感应电动势波形的有效手段。

5) 合理设计阻尼绕组。凡是谐波磁动势与阻尼绕组有相对运动, 都会在阻尼绕组中感应相应电动势和电流, 它具有很好阻尼作用。如果合理选择阻尼绕组节距 t_2 , 对 $(6q+1)$ 次的齿谐波电动势有明显抑制效果。

6) 为了保证船舶交流电网电力品质界面特性符合规范要求, 要对船舶选用的电器设备特性和容量加以限制。尤其是开关电源, 晶闸管电力电子设备及脉冲功率装置的特性及功率要适当匹配。如 GJB 4000—2000 规范中对脉冲设备功率予以限制。

7) 对容量较大的非线性负载, 采用单独供电。如钻井平台直流钻井电机的可控直流电源是功率很大的非线性负载, 就采用一拖一的单独供电方式, 与其他电网隔离, 防止对其他用电设备影响。所供电的同步发电机按功率因数 0.7 或更低值进行设计, 换句话说就是扩大发电机容量。

除上述措施外, 近来很多文献也介绍了若干方法。如采

用正谐波绕组, 在绕组上采用曲折接法, 或在电机定子中嵌入能产生某些要抵消谐波电压的辅助绕组。以上措施有些已用在发电机上, 有些正处在研究阶段, 总之有许多新发展的措施和方法在电机设计中能给予启发、借鉴。

3 舰(船)用交流三相异步电动机

3.1 船用三相异步电动机

船用电动机外壳机械强度较高, 使之能承受冲击振动及一定的倾斜角。使用的环境温度较高, 并伴有凝雾及霉菌的侵蚀, 因此它的绝缘材料、电磁线、浸渍漆等需要经过盐雾试验、长霉试验等环境条件试验。所采用的材料均是滞燃、耐久、耐潮、耐霉和低毒的。电动机的铭牌应为铜质耐蚀材料制成。

由于舰船的电站容量较小, 因此舰船用异步电动机的启动电流倍数要较陆用电动机小。

舰船用异步电动机一般为陆用电机的派生产品。它与陆用同类电动机有相同的定转子冲片尺寸、绕组型式及安装尺寸。但由于使用环境温度较高, 因此可能有较长的铁心及较大的定子导线截面积。

安装于船舶甲板的电动机称为甲板电动机, 主要为起重三相异步电动机及起货三相异步电动机。

船用甲板起重电动机(包括起货电动机)为电磁制动电动机, 由异步电动机和电磁制动器组成, 电动机定子断电后, 制动器制动, 转子迅速制动停转。

甲板起重电动机的非轴伸端带有一圆盘式直流电磁制动器, 它能快速停止、准确定位、频繁启动。该电机由于需频繁启动, 因此它有启动转矩高、启动电流小、转动惯量小等特点。

由于制动器的摩擦材料(摩擦块或摩擦片)经长期使用后(因要频繁制动), 将受到磨损, 使电磁铁与衔铁间的气隙长度增加, 从而使弹簧伸长, 压力降低, 即制动力矩减小而延长了制动时间。同时由于气隙长度的增加, 使衔铁吸合电压升高, 从而延长了衔合时间(严重时甚至不能吸合), 即增加了堵转时间而使温升升高。因此在使用时要经常检查气隙长度并进行调整。

制动器装有人工释放装置, 在不通电时可人工释放, 转子即能轻松转动。

为了避免制动器断电制动时在励磁绕组上产生高电压, 应在励磁绕组两端并联一只放电电阻, 其阻值为 8~15 倍励磁绕组电阻值。制动器的工作制应与电动机相一致。

制动器的结构如图 2.1-10 所示。

当电动机通电时, 制动器同时通电动作, 立即将衔铁吸上, 使安放于电磁铁内的压缩弹簧压缩, 使摩擦块(或摩擦片)与衔铁和电动机端盖脱开, 制动件随同转子一起转动。切断电动机电源, 电磁制动器同时断电, 电磁铁失去电磁吸力, 弹簧立即推动衔铁压紧, 制动件使之产生摩擦力矩, 将电动机转子刹住。

制动器制动时间可用两种方法来测定, 一种方法是电动机在输出额定功率时, 电动机和制动器同时断电, 由测速发电机和 16 线示波器拍摄制动器的制动时间, 这种方法比较符合实际工况。另一种方法是电动机在通电情况下, 调节电动机输入电压(但不超过额定值), 使电动机的堵转转矩等于电动机额定转矩, 在这电压下让电动机空载运转稳定后, 制动器断电制动, 用测速发电机及 16 线示波器拍摄制动时间。

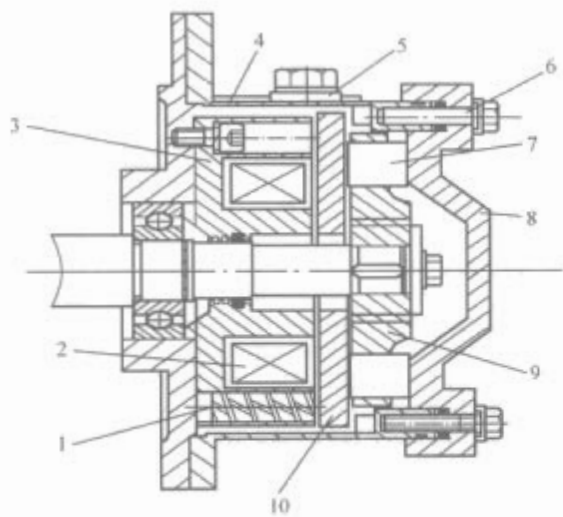


图 2.1-10 制动器结构

1—压缩弹簧；2—励磁线圈；3—铁心；
4—外壳；5—气隙测量台；6—释放螺钉；
7—摩擦块；8—端盖；9—制动件；10—衔铁

这两种方法的区别在于：前一种方法在电动机和制动器断电的瞬间电动机已无转矩输出，但由于惯性作用，此时电动机还带有转动的负载（试验站一般为直流发电机作负载），因此转动惯量较大，且转动惯量又直接与负载的惯量有关。后一种方法是船用甲板起重电动机测量制动器制动时间的常用方法，在制动器断电制动时，电动机还存在额定转矩，但它不带负载，因此转动惯量较小。

船用甲板起重电动机（包括起货电动机）、制动器及其接线盒的外壳防护等级为 IP56。其机座、端盖、接线盒一般都为钢板焊接，以增强强度。电动机一般分为短时工作制及断续周期工作制（S3）。极数有单速、双速及三速（有时有四速）电动机。

船用异步电动机能在下列的环境条件下正常工作：

- 1) 空气相对湿度小于等于 95%，并有凝露。
- 2) 有盐雾、霉菌、油雾及海水的影响。
- 3) 有船舶运行时冲击和振动的影响。
- 4) 倾斜与摇摆：倾斜±22.5°；摇摆±22.5°。

电动机运行期间电源电压变化为额定电压的+6%~ -10%，频率变化为额定频率的±5%时，电动机应能可靠工作。

船用电动机的绕组和外部裸露的金属零部件、紧固件都经过特殊的“三防”工艺处理，整机经过 55℃6 周期的交变湿热试验。电镀件、绝缘材料及表面涂复层均能满足船用环境的要求。

船用三相异步电动机的主要产品分述如下。

3.1.1 Y-H 系列（IP 44）船用三相异步电动机

Y-H 系列（IP 44）船用三相异步电动机是 Y 系列（IP44）

三相异步电动机的特殊环境派生产品。H80~H280 是 20 世纪 80 年代全国统一设计的产品，H315~H355 为 90 年代联合设计的产品，从 90 年代起代替 JO₂-H。该系统电动机为全封闭、自扇冷式船用三相笼型异步电动机，S1 工作制。其额定电压、额定频率为 380V/50Hz、440V/60Hz，外壳防护等级为 IP 44，机座号为 H80~H355。功率在 3kW 以下者为 Y 接法，其他功率均为△接法。其功率等级与安装尺寸的对应关系、绝缘等级、结构及安装尺寸、安装型式等均与 Y 系列（IP 44）相应规格相同。电动机采用的外壳材料和转轴材料均符合 GB/T 7060《船用旋转电机基本技术要求》的规定。风扇、风罩采用金属材料，机座、端盖和轴承盖采用 HT 20-40 铸铁铸造而成，机座表面铸有散热筋，以增加冷却效果。其冷却方法为 IC411。绝缘等级为 B 级或 F 级。

该系列电动机符合我国现行船舶建造和入级规范及 GB 755《电机基本技术要求》的有关规定，电动机一般只有一个圆柱形轴伸，根据需要，对 B 3 及 B 35 型的电机可制成二个轴伸，但第二轴伸仅能用联轴器传递额定功率。

H315、H355 电动机一般作为船用侧推装置的动力。随着我国船舶大型化的发展，特别是大型油轮、大型浮坞的迅速发展，必须要有与之相适应的大容量油泵、水泵电动机相匹配。由于这些电动机的工作性能关系到油轮等大型船舶装卸周期，需要修理的船舶快速准确地进入浮船坞，因此它是船舶的关键设备之一。为了提高船舶的机动性，要求船舶配置侧推装置。目前我国已从瑞典 KAMEWA 公司引进了侧推等辅助推进系统的变螺距螺旋桨制造技术，每年需要有一定数量的 100~375kW 船用交流异步电动机与之配套。目前国外有不少公司已批量生产这类电动机，如 ASEA 公司生产的 MBM 系列，功率为 90~500kW；西门子公司生产的 ILA₆ 系列，功率达到 400kW；奥地利 ELIN 公司生产的 MKG 系列，功率达到 630kW。

目前国内生产的 H315、H355 两个机座号 4、6、8 极，50Hz/380V、60Hz/440V 等 50 余个规格的船用三相异步电动机主要电气性能指标均达到国外同类产品的先进水平，不但能满足中国船级社《钢质海船入级规范》的有关规定，符合 IEC 的有关规定，而且为了适应出口船舶的配套和单机出口的需要，电动机还满足 LR、NK、GL 等国外主要船级社入级规范的要求。

Y-H（IP 44）系列船用三相异步电动机的技术数据见表 2.1-19。该系列相应的行业标准为 JB/T 5273—2002《Y-H 系列（IP 44）船用三相异步电动机技术条件（机座号 80-355）》。

表 2.1-19 Y-H（IP 44）系列船用三相异步电动机的技术数据

型号	额定功率 (kW)	额定电流 (A)		额定转速 (r/min)		堵转转矩/ 额定转矩		堵转电流/ 额定电流		效率 (%)		功率因数	外形尺寸 (mm)												
													IMB3 安装结构			IMB5 安装结构			IMB35 安装结构			IMV1 安装结构			
		50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V		50Hz 380V	60Hz 440V	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高	长	宽
Y80L1-2-H	0.75	1.9	1.55	2820	3460	1.9	1.9	7	7	75	76.5	0.84	0.82	282	230	200	282	230	196	282	250	200	331	230	240
Y80L2-2-H	1.1	2.6	2.15	2820	3460	1.9	1.9	7	7	76.5	77.5	0.85	0.85	282	230	200	282	230	196	282	250	200	331	230	240
Y80L1-4-H	0.55	1.6	1.33	1390	1710	2.0	2.0	6.5	6.0	72.5	74	0.75	0.71	282	230	200	282	230	196	282	250	200	331	230	240
Y80L2-4-H	0.75	2.1	1.75	1390	1710	1.9	1.9	6.5	6.5	74	76	0.75	0.72	282	230	200	282	230	196	282	250	200	331	230	240
Y90S-2-H	1.5	3.4	2.95	2840	3470	1.9	1.9	7	7	79.5	80	0.82	0.80	318	248	214	318	246	208	318	260	214	354	246	248

续表

型号	额定 功率 (kW)	额定电流 (A)		额定转速 (r/min)		堵转转矩/ 额定转矩		堵转电流/ 额定电流		效率 (%)		功率因数		外形尺寸 (mm)											
		50Hz 380V		60Hz 440V		50Hz 380V		60Hz 440V		50Hz 380V		60Hz 440V		IMB3 安装结构			IMB5 安装结构			IMB35 安装结构			IMV1 安装结构		
		长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高
Y90L-2-H	2.2	4.7	4.07	2840	3470	1.9	1.9	7	7.5	82.5	83.5	0.83	0.81	353	248	214	353	246	208	353	260	214	379	246	248
Y90S-4-H	1.1	2.7	2.45	1400	1710	1.9	1.9	6.5	6.5	78	79	0.78	0.75	318	248	214	318	246	208	318	260	214	354	246	248
Y90L-4-H	1.5	3.7	3.2	1400	1710	1.9	1.9	6.5	6.5	79	80.5	0.80	0.77	353	248	214	353	246	208	353	260	214	379	246	248
Y90S-6-H	0.75	2.3	1.91	910	1130	1.8	1.8	6	5.5	72.5	74	0.70	0.67	318	248	214	318	246	208	318	260	214	354	246	248
Y90L-6-H	1.1	3.2	2.81	910	1130	1.8	1.8	6	5.5	72.5	74	0.71	0.68	353	248	214	353	246	208	353	260	214	379	246	248
Y100L-2-H	3	6.4	5.45	2880	3490	1.9	1.9	7	8.5	84	84	0.87	0.86	375	270	239	375	270	236	375	295	239	424	270	278
Y100L1-4-H	2.2	6	4.37	1420	1730	1.9	1.9	7	7.5	61.5	62.5	0.81	0.78	375	270	239	375	270	236	375	295	239	424	270	278
Y100L2-4-H	3	6.8	5.93	1420	1730	1.9	1.9	7	8	83	85	0.81	0.78	375	270	239	375	270	236	375	295	239	424	270	278
Y100L-6-H	1.5	4	3.47	940	1150	1.8	1.8	6	6.5	77.5	79.5	0.73	0.70	375	270	239	375	270	236	375	305	239	424	270	278
Y112M-2-H	4	8.2	7.1	2890	3500	1.9	1.9	7	8	84	84.5	0.87	0.86	393	300	262	393	292	265	393	305	262	442	292	302
Y112M-4-H	4	8.8	7.67	1440	1750	1.9	1.9	7	8.5	84.5	86	0.81	0.79	393	300	262	393	292	265	393	305	262	442	292	302
Y112M-6-H	2.2	5.6	4.89	940	1150	1.8	1.8	6	6.5	79.5	82	0.72	0.68	393	300	262	393	292	265	393	380	262	442	292	302
Y132S1-2-H	5.5	11.1	9.6	2900	3520	1.5	1.5	7	8	86.5	86	0.88	0.87	467	367.5	313	467	362	315	467	380	313	524	362	364
Y132S2-2-H	7.5	15	12.7	2900	3520	1.5	1.5	7	8	87.5	87	0.89	0.88	467	367.5	313	467	362	315	467	380	313	524	362	364
Y132S-4-H	5.5	11.6	9.94	1400	1750	1.8	1.8	7	7.5	86	88	0.83	0.82	467	367.5	313	467	362	315	467	380	313	524	362	364
Y132M-4-H	7.5	15.4	13.2	1400	1750	1.8	1.8	7	8	87	88.5	0.85	0.84	505	367.5	313	505	362	315	505	380	313	561	362	364
Y132S-6-H	3	7.2	6.37	960	1170	1.8	1.8	6.5	7	83.5	83.5	0.76	0.74	467	367.5	313	467	362	315	467	380	313	524	362	364
Y132M1-6-H	4	9.4	8.23	960	1170	1.8	1.8	6.5	7.5	84	86	0.76	0.74	505	367.5	313	505	362	315	505	380	313	561	362	364
Y132M2-6-H	5.5	12.6	10.8	960	1170	1.8	1.8	6.5	7	86	87.5	0.78	0.77	505	367.5	313	505	362	315	505	380	313	561	362	364
Y132S-8-H	2.2	5.8	5.24	710	860	1.7	1.7	5.5	6	80	81	0.72	0.68	467	367.5	313	467	362	315	467	380	313	524	362	364
Y132M-8-H	3	7.7	6.82	710	860	1.7	1.7	5.5	6	82.5	83.5	0.73	0.69	505	367.5	313	505	362	315	505	380	313	561	362	364
Y160M1-2-H	11	21.8	19.1	2930	3540	1.8	1.8	7	8	89	88.5	0.87	0.87	597	422	380	597	420	375	597	435	380	654	440	440
Y160M2-2-H	15	29.4	25.1	2930	3540	1.8	1.8	7	8	89.5	90	0.88	0.88	597	422	380	597	420	375	597	435	380	654	440	440
Y160L-2-H	18.5	35.5	30.3	2930	3540	1.8	1.8	7	7.5	89.5	89	0.88	0.88	641	422	380	641	420	375	641	435	380	698	440	440
Y160M-4-H	11	22.5	19.5	1460	1760	1.8	1.8	7	7.5	88.5	89	0.83	0.83	597	422	380	597	420	375	597	435	380	654	440	440
Y160L-4-H	15	30.3	26	1460	1760	1.8	1.8	7	7.5	89	90	0.84	0.83	641	422	380	641	420	375	641	435	380	698	440	440
Y160M-6-H	7.5	17	14.8	970	1170	1.7	1.7	6.5	7	87.5	88.5	0.70	0.75	597	422	380	597	420	375	597	435	380	654	440	440
Y160L-6-H	11	24.5	21.2	970	1170	1.7	1.7	6.5	7	88.5	88.5	0.76	0.75	641	422	380	641	420	375	641	435	380	698	440	440
Y160M1-8-H	4	9.9	8.87	720	870	1.7	1.7	6	6.5	84	86	0.69	0.67	597	422	380	597	420	375	597	435	380	654	440	440
Y160M2-8-H	5.5	13.3	11.7	720	870	1.7	1.7	6	6.5	85.5	87	0.73	0.72	597	422	380	597	420	375	597	435	380	654	440	440
Y160L-8-H	7.5	17.7	15.4	720	870	1.7	1.7	5.5	6	86	87	0.75	0.73	641	422	380	641	420	375	641	435	380	698	440	440
Y180M-2-H	22	42.2	36.9	2940	3550	1.8	1.8	7	7.5	89.5	89	0.88	0.88	663	449.5	418	663	452	410	663	450	418	720	452	478
Y180M-4-H	18.5	35.9	31	1470	1770	1.8	1.8	7	8	91	91.5	0.86	0.86	663	449.5	418	663	452	410	663	450	418	720	452	478
Y180L-4-H	22	42.5	36.7	1470	1770	1.8	1.8	7	8	91	91	0.87	0.86	701	449.5	418	701	452	410	701	450	418	758	452	478
Y180L-6-H	15	31.4	27.5	970	1180	1.7	1.7	6.5	7.5	88.5	88.5	0.78	0.76	701	449.5	418	701	452	410	701	450	418	758	452	478
Y180L-8-H	11	25.1	21.9	730	880	1.5	1.5	6	7	87	88	0.75	0.74	701	449.5	418	701	452	410	701	450	418	758	452	478
Y200L1-2-H	30	56	49.7	2950	3560	1.7	1.7	7	7.5	89.5	89	0.88	0.88	763	520	464	763	532.5	458	763	535	464	820	532.5	532
Y200L2-2-H	37	68	60.6	2950	3560	1.7	1.7	7	7.5	92	91.5	0.88	0.88	763	529	464	763	532.5	458	763	535	464	820	532.5	532

续表

型号	额定功率 (kW)	额定电流 (A)		额定转速 (r/min)		堵转转矩/ 额定转矩		堵转电流/ 额定电流		效率 (%)		功率因数	外形尺寸 (mm)												
													IMB3 安装结构			IMB5 安装结构			IMB35 安装结构			IMV1 安装结构			
		50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V		50Hz 380V	60Hz 440V	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高	长	宽
Y200L-4-H	39	57	49.8	1470	1780	1.7	1.7	7	8	91.5	92	0.87	0.86	763	529	464	763	532.5	458	763	535	464	820	532.5	532
Y200L1-6-H	18.5	37	33.1	975	1180	1.7	1.7	6.5	7.5	90	90.5	0.83	0.82	763	529	464	763	532.5	458	763	535	464	820	532.5	532
Y200L2-6-H	22	44	38.7	975	1180	1.7	1.7	6.5	7.5	90	90.5	0.83	0.32	763	529	464	763	532.5	458	763	535	464	820	532.5	532
Y200L-8-H	15	33	30	725	882	1.5	1.5	6	6.5	80	90	0.77	0.75	763	529	464	763	532.5	458	763	535	464	820	532.5	532
Y225M-2-H	45	84	72.5	2970	3570	1.7	1.7	7	7.5	90.5	90	0.88	0.86	815	580.5	521	815	586	505	815	590	521	896	586	592
Y225S-4-H	37	69	60.7	1480	1780	1.7	1.7	7	7.5	92	925	0.87	0.87	807	580.5	521	807	586	505	807	590	521	841	586	592
Y225M-4-H	45	84	72.5	1480	1780	1.7	1.7	7	7.5	92.5	92.5	0.88	0.87	840	580.5	521	840	586	505	840	590	521	896	586	592
Y225M-6-H	30	59	50	985	1780	1.5	1.5	6.5	7.5	91	91.5	0.82	0.81	840	580.5	521	840	586	505	840	590	521	896	586	592
Y225S-8-H	18.5	40	36	730	885	1.5	1.5	6	6.5	90.5	91	0.77	0.75	807	580.5	521	807	586	505	807	590	521	841	586	592
Y225M-8-H	22	47.6	42	734	886	1.5	1.5	6	6.5	90.5	91	0.78	0.76	840	580.5	521	840	586	505	840	590	521	896	586	592
Y250M-2-H	55	103	90	2970	3570	1.7	1.7	7	7.5	92	90.5	0.88	0.87	916	677	562				916	710	562	913	677	624
Y250M-4-H	55	103	89	1480	1780	1.7	1.7	7	8	92.5	92.5	0.88	0.88	916	677	562				916	710	562	913	677	624
Y250M-6-H	37	72	61	980	1180	1.5	1.5	6.5	7.5	97	91	0.87	0.87	916	677	562				916	710	562	913	677	624
Y250M-8-H	30	63	55	730	890	1.5	1.5	6	6.5	91.5	92	0.77	0.75	916	677	562				916	710	562	913	677	624
Y280S-2-H	75	139.2	120.9	2925	3528	2	2	7	7.5	92	91.5	0.89	0.89	997	736	634				997	740	634	1064	737	708
Y280M-2-H	90	168	144.2	2940	3546	2	2	7	7.5	92.5	92	0.88	0.89	1048	736	634				1048	740	634	1115	737	708
Y280S-4-H	75	140	120.9	1463	1764	2	2	7	7.5	92.5	92.5	0.88	0.88	997	736	634				997	740	634	1064	737	708
Y280M-4-H	90	164.3	141.9	1463	1764	2	2	7	8	93.5	93.5	0.89	0.89	1048	730	634				1048	740	634	1115	737	708
Y280S-6-H	45	86.4	75.5	980	1190	1.5	1.5	6.5	7	92	92	0.86	0.85	997	736	634				997	740	634	1064	737	708
Y280M-6-H	55	103.2	89.7	980	1190	1.5	1.5	6.5	7	92	92.5	0.88	0.87	1048	736	634				1048	740	634	1115	737	708
Y280S-8-H	37	79.8	68.9	740	890	1.5	1.5	6	6.5	91.5	91.5	0.77	0.77	997	736	634				997	740	634	1064	737	708
Y280M-8-H	45	97.0	80.8	740	890	1.5	1.5	6	6.5	92.5	92.5	0.78	0.79	1048	736	634				1048	740	634	1115	737	708
Y315S-4-H	110/ 122	201	191	1462	1755	1.4	1.4	7.0	7.0	93.5	93.5	0.89	0.88	1270	948	865	1270	906	900	1270	948	865	1390	906	900
Y315M-4-H	132/ 145	236	223	1462	1755	1.4	1.4	7.0	7.0	94.0	93.5	0.89	0.88	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900
Y315L1-4-H	160/ 175	287	270	1462	1755	1.4	1.4	7.0	7.0	94.0	94.0	0.89	0.88	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900
Y315L2-4-H	200/ 218	55	333	1462	1755	1.4	1.4	7.0	7.0	94.0	94.0	0.89	0.88	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900
Y315S-6-H	75/ 82	140	131	970	1164	1.2	1.2	6.5	6.5	92.8	92.8	0.87	0.87	1270	948	865	1270	906	900	1270	948	865	1390	906	900
Y315M-6-H	90/ 100	167	159	970	1164	1.2	1.2	6.5	6.5	93.2	93.2	0.87	0.87	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900
Y315L1-6-H	110/ 122	204	194	970	1164	1.2	1.2	6.5	6.5	93.5	93.5	0.87	0.87	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900
Y315L2-6-H	132/ 145	242	229	970	1164	1.2	1.2	6.5	6.5	93.8	93.8	0.87	0.87	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900
Y315S-8-H	55/ 60	110	104	723	868	1.2	1.2	6.0	6.5	92.0	92.0	0.80	0.80	1270	948	865	1270	906	900	1270	948	865	1390	906	900
Y315M-8-H	75/ 82	149	140	723	868	1.2	1.2	6.0	6.5	92.5	92.5	0.81	0.81	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900

续表

型号	额定 功率 (kW)	额定电流 (A)		额定转速 (r/min)		堵转转矩/ 额定转矩		堵转电流/ 额定电流		效率 (%)		功率因数		外形尺寸 (mm)											
														IMB3 安装结构			IMB5 安装结构			IMB35 安装结构			IMV1 安装结构		
		50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高	长	宽	高
Y315L1-8-H	90/ 100	177	169	723	868	1.2	1.2	6.0	6.5	93.0	93.0	0.82	0.82	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900
Y315L2-8-H	110/ 122	217	206	723	868	1.2	1.2	6.0	6.5	92.3	93.3	0.87	0.87	1340	948	865	1340	906	900	1340	948	865	1490	906	900
Y355M1-4-H	220/ 237	226	209	1489	1789	1.4	1.4	7.0	7.0	94.0	94.0	0.87	0.87	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355M2-4-H	250/ 270	259	244	1490	1790	1.4	1.4	7.0	7.0	94.0	94.0	0.87	0.87	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355L1-4-H	280/ 302	284	264	1488	1189	1.4	1.4	7.0	7.0	94.2	94.2	0.87	0.87	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355L2-4-H	315/ 340	320	298	1489	1189	1.4	1.4	7.0	7.0	94.5	94.5	0.86	0.86	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355M1-6-H	160/ 172	166	154	988	1189	1.3	1.3	7.0	7.0	93.6	93.6	0.86	0.86	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355M2-6-H	185/ 200	192	178	987	1189	1.3	1.3	7.0	7.0	93.8	93.8	0.86	0.86	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355M3-6-H	200/ 216	207	193	988	1189	1.3	1.3	7.0	7.0	93.8	93.8	0.86	0.86	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355L1-6-H	220/ 245	228	218	988	1189	1.3	1.3	7.0	7.0	94.0	94.0	0.86	0.86	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355L2-6-H	250/ 280	259	249	988	1189	1.3	1.3	7.0	7.0	94.2	94.2	0.86	0.86	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355M1-8-H	132/ 145	148	140	743	893	1.3	1.3	7.0	7.0	93.8	93.8	0.81	0.81	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355M2-8-H	160/ 175	180	169	743	893	1.3	1.3	7.0	7.0	93.8	93.8	0.81	0.81	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355L1-8-H	185/ 200	206	192	743	893	1.3	1.3	7.0	7.0	93.9	93.9	0.81	0.81	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035
Y355L2-8-H	200/ 216	222	207	743	893	1.3	1.3	7.0	7.0	94.0	94.0	0.81	0.81	1570	1055	1035	1570	1095	1035	1570	1055	1035	1675	1095	1035

3.1.2 YZ-H 系列船用起重交流三相异步电动机

该系列船用起重三相异步电动机使用于船舶中作短时定额运行的甲板起重机械的电力拖动设备，如锚机绞盘机、绞车等。电动机为自冷却、防水式、结构及安装型式代号一般为 B3、B35、B5、V1、V3 等。电动机的额定电压和额定频率为 380V/50Hz 及 440V/60Hz。非轴伸端一般装有直流圆盘式电磁制动器，制动器的额定吸上电压为直流 110V。在控制系统中不必装降压电阻，即维持电压也为 110V。

电磁制动器不必装降压电阻，因此，不必担心如 JZ2-H 那样因电阻或控制降压电阻的中间继电器损坏而影响电机工作，甚至损坏电机，所以可靠性、安全性较好，但其存在释放时间可能比 JZ2-H 长，制动器绕阻温升可能较高等情况。

电动机的极数有：单速电动机：4 极、6 极；双速电动机：4/12 极、4/16 极；三速电动机：4/8/16 极。

单速电动机只有一套绕组，双速、三速电动机的绕组为双层式，有两套绕组。在三速电动机中，4 极为一套绕组，放在槽底部，8 极与 16 极，合用一套，放在定子槽面部。

单速和双速电动机接线方式为 Y 接法，三速电动机的接线方式为 Y/Y/△或△/YY/△接法。

电动机的工作制：单速电动机为 S2 5 min 和 S2 30min 短时工作制；双速电动机为 S2 30min/10min 和 S2 30min/15min 短时工作制；三速电动机为 S2 10min/30min/5min 短时工作制。

制动器的工作制也与电动机一致。

制动器正常工作气隙为 0.6~2.0mm。因此在使用时应经常测量气隙长度，若超过 2mm，应调整气隙，甚至更换摩擦块或摩擦片。当最大气隙为 2.0mm、制动器线圈电压降到额定电压 80%（88V）时，在电动机规定的使用范围内制动器能有效制动，且不产生二次闭合。在额定电压下，制动器在 1h 内最大允许闭合次数为 120 次，制动器能正常工作，线圈温升也在正常范围内。

制动器的制动力矩能使电动机低速级在额定转矩下，1.5s 内制动，5kW 以下的电动机能在 0.5s 内制动。

采用非封闭轴承的电动机，轴承室设置有加油孔（杯）、放油槽。在机座底部设有用铜质螺栓密封的冷凝水泄放孔。若用户需要，电动机内部可设置加热器，加热器的容量能使机座内部温度至少高于机壳外部温度 5℃，以使机壳内部没有冷凝水。

电动机在热态下，能承受最大转矩（允许计入容差）历

时 15s、能承受 160%额定转矩历时 2min 而不发生损坏及有害变形。双速及三速电动机，慢速级在额定电压时，从实际冷态开始，能承受 1min 堵转而无损坏及有害变形。

电动机在额定电压下，历时 30min 内，空载接通 38 次，对双速电动机其高速级与低速级的起动与换级次数比为 1:2，换级总次数为 114 次，其中高速级为 38 次，换级程序为 0-12P-4P-12P-0，其绕组（包括制动器线圈）温升应在正常范围内。对三速电动机，历时 45min 内，按 40%通电持

续率，空载接通 38 次，4 极：8 极：16 极的换级次数比为 38:76:76，换级程序为 0-16P-8P-4P-8P-16P-0，其绕组（包括制动器线圈）温升应在正常范围内。

YZ-H 系列船用起重三相异步电动机主要技术数据见表 2.1-20。

该系列电动机相应的行业标准为 JB/T 7597—2007《YZ—H 系列船用三相起重异步电动机技术条件》。

3.1.3 YZW-H 系列船用稳索绞车用三相异步电动机

表 2.1-20 YZ-H 系列船用起重三相异步电动机主要技术数据

型号	功率 (kW)	工作 方式	额定 电压 (V)	额定电流 (A)	起动电流/ 额定电流	起动转矩/ 额定转矩	直流电磁制动器		外形尺寸 (mm)		
							额定 电压 (V)	额定制 动力矩 (kg·m ²)	长	宽	高
YZ-112S-4-H	1.5	短时 30min	380	3.92	5	2.3	110	不小于 1.2 倍 电机的 额定 转矩	435	285	222
YZ-112M-4-H	2.2		380	5.42	5	2.3	110		460	285	222
YZ-112L-4-H	3.7		380	8.94	5	2.3	110		480	285	222
YZ-112S-6-H	1.1		380	3.38	5	2.3	110		435	285	222
YZ-112M-6-H	1.5		380	4.27	5	2.3	110		460	285	222
YZ-112L-6-H	2.2		380	6.15	5	2.3	110		480	285	222
YZ-132M1-4-H	5.5		380	12.1	5	2.5	110		545	333	262
YZ-132M2-4-H	7.5		380	16	5	2.5	110		580	333	262
YZ-132S-6-H	3.7		380	9.3	5	2.3	110		545	333	262
YZ-132M-6-H	5.5		380	13.8	5	2.5	110		580	333	262
YZ-160S-6-H	7.5		380	17.69	5	2.5	110		650	403	310
YZ-160L-6-H	11		380	25.1	5	2.5	110		730	403	310
YZ-180L-6-H	55		380	36.07	5.5	2.2	110		800	406	390
YZ-200M-6-H	18.5		380	43.94	5.5	2.2	110		800	460	452
YZ-225S-6-H	22		380	50.97	5.5	2.2	110		890	520	510
YZ-132M-4/12-H	3/1.1	30/10min	380	8.40/7.60	5.5/2.5	1.9/1.7	110		590	267	309
YZ-132L-4/12-H	4/1.5		380	10.30/9.10	5.5/2.5	1.9/1.7	110		615	267	309
YZ-160-4/12-H	6.3/2.2		380	15.4/12	5.5/2.5	1.9/1.7	110		740	315	363
YZ-180L-4/12-H	8.5/3.5		380	19.30/18	5.5/2.5	1.9/1.7	110		810	395	411
YZ-180L-4/16-H	11/3	30/15min	380	25/16.60	5.5/2.5	1.9/1.7	110		810	395	411
YZ-200M-4/16-H	15/4		380	32.80/24.10	5.5/2.5	1.9/1.7	110		810	457	465
YZ-200L-4/16-H	18.5/5.5		380	40.4/32.6	5.5/2.5	1.9/1.7	110		846	457	465
YZ-200S-4/8/16-H	9/9/4.2		380	21.4/24.7/37.2	6.8/5.5/2.5	1.8/1.9/1.7	110		600	485	390
YZ-200L-4/8/16-H	12.5/12.5/5.7	10/30/ 5min	380	29.3/34.3/49.5	6.8/5.5/2.5	1.8/1.9/1.7	110		675	485	390
YZ-225S-4/8/16-H	16.8/16.8/8		380	38.9/46.2/67.6	6.8/5.5/2.5	1.8/1.9/1.7	110		690	538	430
YZ-225L-4/8/16-H	22.5/22.5/10.6		380	51.5/60.3/85.6	6.8/5.5/2.5	1.8/1.9/1.7	110		760	538	430
YZ-250S-4/8/16-H	30/30/14.5		380	63.2/71.3/91.4	6.8/5.5/2.5	1.8/1.9/1.7	110		780	640	530
YZ-250M-4/8/16-H	42/42/20		380	86.3/95/112.6	6.8/5.5/2.5	1.8/1.9/1.7	110		830	640	530
YZ-280S-4/8/16-H	56/56/27		380	112.4/120.6/123.2	6.8/5.5/2.5	1.8/1.9/1.7	110		880	730	590
YZ-280L-4/8/16-H	75/75/36		380	148.9/161.5/164.3	6.8/5.5/2.5	1.8/1.9/1.7	110		970	730	590

该系列电动机适用于船舶双杆吊系统用于调整和固定吊杆水平位置的稳索绞车用三相异步电动机。电动机的额定电压及频率为 50Hz、380V 或 60Hz、440V。制动器的额定电

压为直流 110V。工作制为 S2 10min 短时工作制和 S3 40% 断续周期工作制。电动机全部为 8 级，△接法，其结构及安装形式为 IM3001 (IMB5)，外壳采用钢质材料制成，材料

的性能不低于 Q₂₃₅-A 的规定。

稳索绞车电动机应属于甲板起重电动机的范围,基本按照船用甲板起重电动机的原则进行设计,但由于其工况又与一般甲板起重电动机相比,有其特殊性,因此有以下几点区别:

- (1) 稳索绞车电动机的转差范围在 0~2 之间,且转差在 1~2 的范围内,转矩特性的曲线具有上升的特性。
- (2) 吊杆回转时,为防止货物来回晃动,一台稳索绞车电动机要拖着另一台低压启动运行且产生一个小的逆转矩的稳索绞车电动机,因此电动机必须具有良好的启动性能,即较高的启动转矩和较小的启动电流。电动机的转矩等级应为 KL13W,即电动机应能带动一个额定转矩 130% 负载直接启动。
- (3) 当双杆作业系统在进行双杆作业工况时,两吊杆经调整钩头落舱点后需固定位置。吊杆的水平定位由安装于电动机非轴伸端的制动器的制动力矩来实现。即稳索绞车电动机需承受稳索上的静拉力,而且此拉力随着起货量、舢装布置及吊构头落舱点变化而变化。为安全起见,制动器的制动力矩应为最大静拉力的 1.5 倍。此外由于稳索的静拉力可能长期作用于电动机轴上,考虑到电动机轴的强度,转轴和转

- 子内径选择得比较大。
- (4) 对 S3 40% 断续周期工作制的稳索绞车电动机,采取了热保护。热保护一般由控制回路中的过电流继电器及埋置在电动机定子绕组的热敏电阻来实现。前者在电动机堵转情况下特别有效,而后者能防止电动机定子绕组过热。二者结合起来为电动机提供了安全可靠的热保护。堵转、超载、运行方式超过了规定的运行方式、单相运行、电压及频率超过正常值较大、环境温度过高等均能得到有效保护。采用的热敏电阻为正温度系数热敏电阻,二只或三只热敏电阻间隔埋置于电动机定子绕组端部,互相串联后,连接线接到出线盒里的接线柱子上。由于热敏电阻特性的分散性,因此埋置以前都进行了筛选。一般 B 级绝缘采用 125℃ ± 5℃、F 级绝缘采用 145℃ ± 5℃ 的电阻转折温度。
 - (5) 电动机在 1/3 额定电压下,转差率 $s=2$ 时的转矩不小于 15% 额定转矩。

YZW-H 系列船用稳索绞车用三相异步电动机主要技术数据见表 2.1-21。该系列电动机相应的行业标准为 JB/T 7567—2005《船用稳索绞车用三相异步电动机技术条件》。

3.1.4 YHLQ-H 系列船舶起货机用恒转矩三相异步电动机

表 2.1-21 YZW-H 系列船用稳索绞车用三相异步电动机主要技术数据

型号	功率 (kW)				堵转转矩/额定转矩、 最大转矩/额定转矩				功率因数				效率 (%)				堵转 电流/ 额定 电流	制动力矩 (N·m)	外形尺寸 (mm)		
	S2 10min		S3 40%		S3 40%		S3 40%		S2 10min		S3 40%		S2 10min		S3 40%				法兰外 径 P	凸缘 直径 N	总长 L
	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V	50Hz 380V	60Hz 440V					
YZW 160M-8-H	7.5	86	4.3	5.0	2.0	2.2	2.2	2.4	0.72	0.72	0.68	0.68	76.0	76.0	78.0	78.0	5.0	250	350	250	680
YZW 160L-8-H	12.0	13.0	7.0	8.0	2.0	2.2	2.2	2.3	0.77	0.77	0.73	0.73	76.0	76.0	79.0	79.0	5.0	250	350	250	750
YZW 200S-8-H	—	—	11.0	12.8	—	—	1.9	2.0	—	—	0.70	0.70	—	—	76.5	76.5	5.0	350	400	300	750
YZW 200L-8-H	—	—	14.0	16.3	—	—	2.0	2.0	—	—	0.74	0.74	—	—	81.5	81.5	5.0	350	400	300	820
YZW 225S-8-H	—	—	16.0	18.6	—	—	2.0	2.0	—	—	0.76	0.76	—	—	83.0	83.0	5.0	620	450	350	850

该系列使用于要求频繁操作,经常启动、制动和正反转的断续工作制,如作为船舶起货机械和特种绞车的电力拖动等。

按功率大小,电动机分为二速、三速和四速三种。但同一电动机的任意功率等级下的转矩是相同的,所以称之为恒转矩电动机。该系列电动机为变速电动机,功率及转速均按极数变化而变化。电动机的结构型式为无底脚,端盖带凸缘, B5 安装,单轴伸,外壳防护等级为 IP 56。冷却方式为:凸缘直径 250mm 为自然冷却,凸缘直径 450mm 及以上的为轴向强迫通风,自带风机,机座下带有风箱并装有风门行程开关,只有打开风门,才能使风机启动,电动机与风机连锁,必须先启动风机而后才能启动电动机。当风机关闭时,电动机电源即自动切断。

电动机的机座及端盖采用铸钢或钢板焊接而成。二速电动机为一个铁心两套双层叠绕组,4 极绕组在槽的底部,8 极 (12 极) 绕组在槽的上部。三速及四速绕组为两个铁心,其中一个铁心放四极和 8 极,另一个铁心放 24 极或 28 极绕组。四速电机的 2 极高速挡与 4 极合用一套绕组。电动机转子上的导条上笼用黄铜条,下笼用紫铜条,并通过紫铜环将上、笼导条分别焊接成一体。电动机定子各极绕组端部埋置

有二只正温度系数热敏电阻,以进行热保护,电阻的动作温度为 F 级 140℃ ± 5℃, H 级 160℃ ± 5℃。

电动机额定电压及额定频率为 380V、50Hz 与 440V、60Hz 通用。

电动机输出功率 P_2 按式 (2.1-6) 或式 (2.1-7) 计算

$$P_2 = Gv/6.12\eta \tag{2.1-6}$$
$$P_2 = Mn/975 \tag{2.1-7}$$

式中: G 为钢丝绳拉力, t; v 为重物上升速度, m/min; η 为齿轮箱效率, %; M 为电动机转矩, N·m; n 为电动机转速, r/min。

四速电动机可作为船舶恒张力自动系缆机电动机。恒张力自动系缆机是万吨级货轮、滚装船及工程船的先进系泊设备,是船舶系泊时能保持缆绳张力恒定的装置。船舶系泊时,由于载货量变化而产生船舶吃水量的变动,由于潮汐的涨落而使甲板面与码头平面之间产生高低变化,由于装卸过重货物而造成船舶的倾斜,由于港内波浪和水流、风向等原因而引起的船舶移动和摇摆,还有许多其他原因而使系船缆绳的拉力发生急剧增加或减小,这都会使船舶移位或缆绳拉断造成危险。为了避免这类事故,船员必须对系船缆绳进行

定期检查，凭经验由人工进行收缆或放缆。这样缆绳的拉力就不可能保持恒定，尤其当系泊时遇到风浪，船员调整缆绳的拉力就非常困难，而且容易发生意外事故。船舶装有自动系统缆机后，当系船缆绳拉力发生变化时，电动机能自动驱动主卷筒，放出或收紧缆绳，保持缆绳的拉力恒定，以防止缆绳拉断或松弛而使船舶移位。

国外自动系统缆机于 20 世纪 70 年代开始应用于船上，检测缆绳拉力有两种方法：一种是采用机械式张力检测装置，该装置安装在齿轮箱内，当缆绳张力发生变化时，检测装置就起动电动机，以达到调整缆绳张力的目的，如西门子公司、波兰 ELMOR 工厂生产的自动系统缆机就是这种型式。另一种是利用电动机本身进行张力检测。电动机在收缆方向上，以预定的周期作间隙性起动运转，电动机的堵转转矩即为张力检测整定值。如果缆绳张力大于电动机堵转转矩，电动机将在缆绳张力的作用下反转，即放缆；反之，如果缆绳张力小于电动机堵转转矩，电动机就正转，收紧缆绳，直至电动机堵转，即缆绳张力与电动机堵转转矩平衡为止。日本的神钢、东京机械、三菱工厂生产的自动系统缆机就是采用这种方法。国内生产的自动系统缆机即采用电气张力检测的方式，这种方式比较简单可靠，在控制线路中利用时间间隔振荡器，以预定的周期，间隙地起动电动机。

对于自动系统电动机来说，不同的输入电压，就有不同的堵转转矩，因此改变输入电压，即可得到不同的张力整定值。以 10t 恒张力自动绞缆机为例，使用的电动机为 YHLQ-H (D) 550-2/4/8/24，由 24 极挡的 $I_d=f(U_d)$ 和 $M_d=f(U_d)$ 的特性曲线以及绞车机械尺寸得出表 2.1-22 数据。

表 2.1-22 10t 船舶恒张力自动系统缆机参数

张力整定值 (t)	堵转转矩 (N·m)	输入电压 (V)	堵转电流 (A)
7.5	265	270	48
5.0	177	230	42
3.0	108	180	38

由此可以看出，在张力整定值为 7.5 吨挡，即电动机堵转转矩为 264.8N·m (27kgf·m)，电动机输入电压为 270V，堵转电流为 48A，小于其额定电流 52A，且自动绞缆工况为每隔 2min 通电 20s，即负载持续率为 14.3%。因此，从电动机温升的角度来看，完全可以满足自动绞缆工况的要求。

由于机械效率的作用，自动收放缆时动力或缆绳拉力将损失部分能量，因此开始收缆或放缆时缆绳的张力值是不同的，其差值范围取决于机械效率的大小。这个范围称之为自动工况的“迟钝区”，不同张力整定值有不同的“迟钝区”。正是由于这个迟钝区的存在，防止了自动绞缆机过于灵敏而产生有害的“收放缆振荡”，有利于全船各绞缆自动工况的平衡。仍以 10t 恒张力自动系统缆机为例，自动控制时：张力整定值为 7.5/5/3t；开始收缆时缆绳张力为 6/4/2.4t；开始放缆时缆绳张力为 9.4/6.3/3.8t。

YHLQ-H 系列船舶起货机用恒转矩三相异步电动机主要技术数据见表 2.1-23。

关于其他特殊用途的船用交流三相异步电动机（非系列电动机）不再作一一介绍。

表 2.1-23 YHLQ-H 系列船舶起货机用恒转矩三相异步电动机主要技术数据

型 号		YHLQ-H (D) 250-4/8	YHLQ-H (D) 350-4/12	YHLQ-H (D) 450-4/8/24	YHLQ-H (D) 530-4/8/28	YHLQ-H (D) 550-4/8/24
额定功率 (kW)		7.5/3.7	15/5	30/15/3.7	38/19/4.1	44/22/5.2
负载持续率 (%)		25/15	25/15	25/25/25	25/25/25	25/25/25
直流电磁 制动器	额定电压 (V)	99	99	99	94	99
	制动力矩 (N·m)	118	206	422	490	637
堵转电流/额定电流		4.5/2.5	5.5/3.5	4.5/4.0/2.5	4.5/4.0/2.5	4.5/4.0/2.5
堵转转矩/额定转矩		1.6/1.8	2.0/2.2	1.6/1.6/1.8	1.6/1.6/1.8	1.6/1.6/1.8
最大转矩/额定转矩		2.0/1.8	2.2/2.0	2.0/1.8/1.8	2.0/1.8/1.8	2.0/1.8/1.8
效率 (%)		82/76	82/68	84/78/45	83/80/29	86/81/45
功率因数		0.81/0.57	0.81/0.42	0.76/0.54/0.30	0.82/0.55/0.30	0.80/0.62/0.30
每小时换挡次数		350/700	350/700	320/640/960	320/640/960	320/640/960
换挡程序						
外形尺寸 (mm)	法兰外径 P	350	450	550	630	650
	凸缘直径 N	250	350	450	530	550
	总长 L	715	1025	1395	1250	1410

3.2 舰用三相异步电动机

舰用电动机与船用电动机比较，主要是使用的环境条件

不尽相同，具体比较见表 2.1-24。

由以上比较可知，舰用电机的使用环境要比船用电动机更为严酷，因此舰用电动机根据其特点，在船用电动机的

表 2.1-24 舰用、船用三相异步电动机使用环境条件比较

	船用异步电动机	舰用异步电动机
环境空气温度	根据钢度海船入级与建造规范（2001 版）规定：围蔽处所内：无限航区为 0~45℃；除热带海区以外的有限航区为 0~40℃；开敞甲板：无限航区为 -25℃~45℃，除热带海区以外的有限航区为 -25℃~40℃	根据 GJB 812A—200X《舰用三相异步电动机规范》的规定 1) 水面舰艇为 5~50℃ 2) 潜艇为 5~45℃ 3) 安装在露天甲板上或类似场所为 -30℃~65℃
倾斜	横倾 22.5°，横摇 22.5°；纵倾 10°，纵摇 10°；可同时发生横向和纵向倾斜	倾斜±15°，短时（3min）±30°（潜艇），摇摆±45℃，周期 3~14s
电压和频率波动	电压：为额定电压的+6%~-10% 频率：为额定频率的±5%	电压：为额定电压的±10% 频率：为额定频率的±5%
冲击和振动	有船舶正常运营时是产生的冲击、振动，紧固螺栓和螺母不会由于振动而松脱。一般不作冲击及振动试验	按 GJB 150.18 的规定进行冲击试验，试验结果：任何零部件不得断裂；任何部件不得出现明显变形和错位；与试验前相比，转速不得相差 1%以上，空载输入功率不得相差 5%以上；绕组对机壳和绕组间绝缘应能承受 1500V 耐电压试验，历时 1min 而不发生击穿和闪络现象 按 GJB 150.10 的规定进行振动试验，按 ZJB K04028 规定进行颤震试验，试验结果：无机械损坏或损伤；紧固件牢固，无松动现象
耐潮性能	按 GB/T 7060 规定进行 55℃、6 周期交变湿热试验	按 GJB 150.9 中规定的 60℃ 5 周期进行交变湿热试验
防霉性能	按 GB/T 2423.16 规定进行长霉试验，严酷程度为 28d，试验结果应符合上述标准的二级要求	按 GJB 150.10 规定进行长霉试验，试验周期为 28d，试验结果应不大于上述标准中规定的 2 级长霉程度
耐盐雾性能	按 GB/T 2423.17 规定进行耐盐雾试验，结果应符合 JB/T 4159 中表 3 的规定	按 GJB 150.11 的规定进行盐雾试验，试验结果在试件表面应无腐蚀物出现
结构噪声	一般无此规定	按 GJB 763.2 的规定进行试验，以振动加速度表示，检验时允许用平均值代替。结果应不大于上述标准中图 1 的 3 类规定

基础上作相应的改进。如，环境温度比舰用电动机高，铁心的长度及绕组参数都要作相应的改动。又如：舰用电动机对冲击及振动有较高的要求，因此机壳及端盖等的材料强度要比船用电动机高，一般为铸钢或钢板焊接而成；紧固件的机械强度一般采用 8.8 级等。

舰用三相异步电动机的主要产品分述如下。

3.2.1 JY-H 系列舰用三相异步电动机

JY-H 系列舰用三相异步电动机是 Y-H 系列电机的派生

电机，封闭自扇冷式笼型电动机，是全国统一设计的产品，适用于舰船上作驱动各种机械用，如泵类、通风机械、分离器及其他辅助设备等等。它符合 GJB 812A—1990《舰用三相异步电动机通用规范》，并符合 IEC34、IEC72、IEC92、MIL 等标准规定。安装型式有 IMB3、IMB5、IMB35、IMV1 等。

JY-H 系列舰用三相异步电动机主要技术数据见表 2.1-25。

表 2.1-25 JY-H 系列舰用三相异步电动机主要技术数据

型 号	额定功率 (kW)	满 载 时				堵转转矩/ 额定转矩	最大转矩/ 额定转矩	堵转电流 (A)	转动惯量 (kg·m ²)	质 量 (kg)
		转速 (r/min)	电流 (A)	效率 (%)	功率因数					
JY801-2H	0.75	2830 3460	1.82	75.5	0.83	1.8	2.5	14.8	0.000 75	16
JY802-2H	1.1		2.55	77	0.85			21.5	0.000 90	17
JY90S-2H	1.5	2840 3470	3.54	78.5	0.84	1.7	2.4	29.5	0.001 2	22
JY90L-2H	2.2		4.8	82	0.85			43	0.001 4	25
JY100L-2H	3.0	2870 3490	6.32	82	0.88	1.6	2.15	57.2	0.002 9	35
JY112M-2H	4.0	2890 3500	8.17	85.5	0.87			71.6	0.005 5	48
JY132S1-2H	5.5	2900 3520	11.1	85.5	0.88	1.5	2.0	92.4	0.010 9	67
JY132S2-2H	7.5		15	86.2	0.88			117.7	0.012 6	72
JY160M1-2H	11	2930 3540	21.58	87	0.89	1.4	1.3	159.4	0.037 7	122
JY160M2-2H	15	2930 3540	29.1	88	0.89	1.4		213.3	0.044 9	130
JY160L-2H	18.5		35.5	89	0.89	1.3	2.0	267.3	0.055	152
JY180-2H	22	2940 3550	42.2	89	0.89			317.9	0.075	180
JY200L1-2H	30	2950 3560	56.9	90	0.89	1.2	2.0	425.7	0.124	240
JY200L2-2H	37		69.8	90.05	0.89			530.2	0.139	255
JY225M-2H	45	2970	3570	84.4	91	1.2	2.0	635.8	0.233	309
JY250M-2H	55		3570	103	91.2			794.2	0.312	403
JY280S-2H	75		3580	139.9	91.5			1061.5	0.597	544
JY280M-2H	90		3580	167	92			1327.7	0.675	620

续表

型 号	额定功率 (kW)	满 载 时				堵转转矩/ 额定转矩	最大转矩/ 额定转矩	堵转电流 (A)	转动惯量 (kg·m ²)	质 量 (kg)	
		转速 (r/min)		电流 (A)	效率 (%)						功率因数
JY801-4H	0.55	1390	1710	1.59	74	2.5	3.0	10.8	0.001 8	17	
JY802-4H	0.75			2.1	75			0.72	14.8	0.002 1	19
JY90S-4H	1.1	1400		2.86	78	0.75	2.35	2.8	21.5	0.002 1	22
JY90L-4H	1.5			3.77	79.5	0.76	2.15	2.7	29.5	0.002 7	27
JY100L1-4H	2.2	1430	1740	5.03	81	0.82	1.85	2.5	43	0.005 4	34
JY100L2-4H	3.0			6.82	82.5	0.81	1.75	2.25	57.2	0.006 7	38
JY112M-4H	4.0	1440	1750	8.77	84.5	0.82	1.75	2.25	71.6	0.009 5	52
JY132S-4H	5.5			11.6	85.5	0.84	1.65	2.15	92.4	0.021 4	70
JY132M-4H	7.5	1440	1750	15.4	87	0.85	1.6	2.0	117.7	0.029 6	80
JY160M-4H	11	1460	1760	22.61	88	0.84	1.5		169.4	0.074 7	130
JY160L-4H	15			30.13	89	0.85			213.3	0.091 8	149
JY180M-4H	18.5	1470	1770	35.9	91	0.86	1.4		267.3	0.139	182
JY180L-4H	22			42.48	91.5	0.86			317.9	0.158	192
JY200L-4H	30	1480	1780	57.26	91.5	0.87	1.4		425.7	0.262	270
JY225S-4H	37			70.6	91.5	0.87			530.2	0.406	284
JY225M-4H	45			84.45	92	0.88			633.8	0.469	338
JY250M-4H	55			102.7	92.5	0.88			794.2	0.66	427
JY280S-4H	75			139.7	92.7	0.88			1061.5	1.12	562
JY280M-4H	90			164.3	93.5	0.80			1327.7	1.46	667
JY90S-6H	0.75	910	1130	2.2	73	0.68	1.7		17.8	0.002 9	23
JY90L-6H	1.1			3.25	74	0.70	1.6		21.5	0.003 5	25
JY100L-6H	1.5	940	1150	4.03	77.5	0.73		1.6	2.1	29.5	0.006 9
JY112M-6H	2.2	940	1150	5.84	81	0.72	2.0		43	0.013 8	48
JY132S-6H	3.0	960	1170	7.14	83	0.76	1.5	2.0	57.2	0.028 6	65
JY132M1-6H	4.0			9.52	84	0.77		1.9	71.6	0.035 7	35
JY132M2-6H	5.5			12.46	85	0.79			92.4	0.044 9	82
JY160M-6H	7.5	970		1180	17.13	86.5	0.77	1.4	1.9	117.7	0.088 1
JY160L-6H	11		25		87	0.77	169.4			0.116	152
JY180L-6H	15		1180	33	80	0.81	213.3			0.207	195
JY200L1-6H	18.5			37.6	89.5	0.83	207.4			0.315	220
JY200L2-6H	22			44.8	89.5	0.83	317.9			0.360	250
JY225M-6H	30			980	1180	61.1	90			0.84	1.4
JY250M-6H	37	71	90.5			0.86	530.2	0.834	408		
JY280S-6H	45	1190	86.4		92	0.87	635.8	1.39	536		
JY280M-6H	55		103.2		92	0.87	794.2	1.65	595		

3.2.2 JYZC 系列舰用低噪声三相异步电动机

该系列电动机外壳结构型式为防滴式和防溅式二种，它适用于舰艇上作驱动各种机械，如泵类、通风机、分离器、液压机械及其他辅助设备的动力。

该系列电动机安装型式有 IMB3、IMB35、IMV1 和 IMV15 四种，安装尺寸与功率等级对应关系符合 IEC 规定，与 JY-H 系列电动机可互换。电动机的额定电压为 380V，额定频率为 50Hz。

为进一步提高我国舰船素质，加强海事建设，研制低噪声的舰用三相异步电动机成为一项迫切的任务。舰船的隐蔽性是十分重要的战术指标之一，关系到舰船的生命力和战斗

力，而舰用交流电动机是舰船较大的噪声源之一，严重影响舰船的隐蔽性和船员工作的生活环境。因此该系列电动机的生产与使用，对降低舰船特别是潜艇的噪声具有十分重要意义，并对今后的舰用电机的研制打下良好的基础。

该系列电动机噪声指标处于国内领先水平，比目前的舰用电动机噪声降低 10~15dB，其解决噪声的主要方法为：

(1) 降低通风噪声。

1) 减小电动机的损耗，设计合理的电机结构是降低通风噪声的因素。由于噪声功率 $W \propto QH^2$ (Q 为风量, H 为风压), 而 $H \propto ZQ^2$ (Z 为风阻), 因此，为了降低噪声，必须降低要求的风量及减小风道的风阻。

2) 合理的风扇和风罩结构及材料,对降低噪声有较大的作用。根据声能公式 $L_P = 70 \lg D + 50 \lg N + K$ (D 为风扇外径, N 为转速, K 为常数), 尽可能减小风扇外径, 改善叶片的形状等。对于单方向运转的电动机可以采用轴流式通风系统, 能大幅度降低风摩擦损耗和噪声。

(2) 降低轴承噪声。如: 选择低噪声的轴承, 提高转轴轴承挡及轴承室的配合精度; 提高轴承挡及轴承室的表面光洁度; 增加合适的波形弹簧片, 给轴承外圈施加轴向预压力; 提高装配质量等。

(3) 降低电磁噪声。电磁噪声是由于电机的电磁力引起

的噪声及引起机壳的振动而产生的噪声。为此, 必须在电磁方案的设计上, 对定转子槽配合、斜槽、绕组型式、定转子槽口宽度、气隙磁通密度和气隙长度等方面进行合理的设计, 并提高装配质量。

因此, 降低电动机的噪声必须优化电动机的电磁方案、提高电气性能、改进机械结构等。

JYZC 系列舰用低噪声三相异步电动机主要技术数据见表 2.1-26。与该系列电动机相应的标准为 GJB 5248—2003 《舰用低噪声三相异步电动机通用规范》。

表 2.1-26 JYZC 系列舰用低噪声三相异步电动机主要技术数据

型 号	功率 (kW)	效率 (%)		堵转转矩/ 额定转矩	最大转矩/ 额定转矩	最小转矩/ 额定转矩	堵转电流 (A)		空气噪声 (声功 率级) (dB)		结构噪声 (振动加速度级平均值) (dB)	
		防滴外壳	防溅外壳				防滴外壳	防溅外壳	防滴结构	防溅结构		
JYZC80 ₁ -2	0.75	75.5	75.5	1.8	2.5	1.2	15	15	64	69	水面舰艇 用电动机 为 135	潜艇用电 动机为 130
80 ₁ -4	0.55	74.0	74.0	2.5	3.0	1.4	11	11	64	69		
80 ₁ -6	0.37	62.0	62.0	1.8	2.4	1.2	7	7	64	69		
JYZC80 ₂ -2	1.1	77.0	77.0	1.8	2.5	1.2	22	22	64	69		
80 ₂ -4	0.75	75.0	75.0	2.5	3.0	1.3	15	15	64	69		
80 ₂ -6	0.55	65.0	65.0	1.7	2.75	1.2	11	11	64	69		
80 ₂ -8	0.25	54.0	54.0	1.7	2.4	1.1	5	5	64	69		
JYZC90S-2	1.5	78.5	78.5	1.8	2.4	1.1	30	30	65	70		
90S-4	1.1	78.0	78.0	2.35	2.8	1.3	22	22	64	69		
90S-6	0.75	73.0	73.0	1.7	2.65	1.2	15	15	64	69		
90S-8	0.37	62.0	62.0	1.7	2.4	1.1	5	5	64	69		
JYZC90L-2	2.2	82.0	82.0	1.7	2.3	1.1	43	43	65	70		
90L-4	1.5	79.5	79.5	2.15	2.7	1.3	30	30	64	69		
90L-6	1.1	74.0	74.0	1.7	2.5	1.2	22	22	64	69		
90L-8	0.55	63.0	63.0	1.7	2.2	1.1	11	11	64	69		
JYZC100L1-2	3.0	82.0	83.5	1.7	2.15	1.1	52	57	68	73		
100L1-4	2.2	81.0	81.5	1.85	2.5	1.2	43	43	64	69		
100L1-6	1.5	77.5	77.5	1.7	2.4	1.1	30	30	64	69		
100L1-8	0.75	71.0	71.0	1.7	2.15	1.1	15	15	64	69		
JYZC100L2-4	3.0	82.5	83.0	1.75	2.25	1.2	52	57	64	69		
100L2-8	1.1	73.0	73.0	1.7	2.1	1.0	22	22	64	69		
112M-4	4.0	84.5	84.5	1.75	2.25	1.2	65	72	64	69		
112M-6	2.2	81.0	81.0	1.7	2.3	1.1	43	43	64	69		
JYZC112M-2	4.0	85.5	86.5	1.7	2.15	1.1	65	72	68	73		
112M-8	1.5	75.0	75.0	1.7	2.1	1.0	30	30	64	69		
JYZC132S1-2	5.5	85.5	86.5	1.7	2.0	1.0	84	90	80	86		
132S1-4	5.5	85.5	86.0	1.7	2.15	1.1	84	92	67	73		
132S1-6	3.0	83.0	83.5	1.7	2.15	1.1	52	57	65	70		
132S1-8	2.2	80.0	80.0	1.7	2.05	1.0	43	43	65	70		
JYZC132S ₂ -2	7.5	86.5	87.5	1.7	2.0	1.0	107	118	80	86		
JYZC132M1-4	7.5	87.0	87.0	1.7	2.0	1.1	107	118	67	73		
132M1-6	4.0	84.0	84.0	1.7	2.15	1.1	65	72	65	70		
132M1-8	3.0	82.0	82.5	1.7	2.05	1.0	52	57	65	70		
132M2-6	5.5	85.0	86.0	1.7	2.05	1.1	84	92	67	73		
JYZC160M1-2	11.0	87.0	89.0	1.7	2.0	1.0	154	169	80	86		
160M1-4	11.0	87.5	88.5	1.7	2.0	1.1	154	169	69	75		

续表

型 号	功率 (kW)	效率 (%)		堵转转矩/ 额定转矩	最大转矩/ 额定转矩	最小转矩/ 额定转矩	堵转电流 (A)		空气噪声 (声功 率级) (dB)		结构噪声 (振动加速度级平均值) (dB)	
		防滴外壳	防溅外壳				防滴外壳	防溅外壳	防滴结构	防溅结构		
160M1-6	7.5	85.0	87.5	1.7	2.0	1.1	107	118	67	73	水面舰艇 用电动机 为 135	潜艇用电 动机为 130
160M1-8	4.0	84.0	84.0	1.7	2.05	1.0	65	72	65	70		
JYZC160M2-2	15	88.0	89.5	1.7	2.0	1.0	194	213	80	86		
160M2-8	5.5	83.5	85.5	1.7	2.0	1.0	84	92	67	73		
JYZC160L-2	18.5	89.0	89.5	1.7	2.0	1.0	243	267	80	86		
160L-4	15	88.0	89.0	1.7	2.0	1.1	194	213	69	75		
160L-6	11	86.5	88.0	1.7	2.0	1.1	154	169	67	73		
160L-8	7.5	85.0	86.0	1.7	2.0	1.0	107	118	67	73		
JYZC180M-2	22	89.5	89.5	1.7	2.0	1.0	289	318	80	87		
180M-4	18.5	89.0	91.0	1.7	2.0	1.0	243	267	74	80		
JYZC180L-4	22	89.5	91.5	1.7	2.0	1.0	289	318	76	83		
180L-6	15.0	88.0	89.0	1.7	2.0	1.1	194	213	69	75		
180L-8	11	86.5	87.0	1.7	2.0	1.0	154	164	67	73		
JYZC200L1-2	30	89.5	90.0	1.7	2.0	1.0	387	426	67	73		
200L1-4	30	90.5	91.5	1.7	2.0	1.0	387	426	76	83		
200L1-6	18.5	88.5	90.0	1.7	2.0	1.0	243	267	67	73		
200L1-8	15	87.5	89.0	1.7	2.0	1.0	194	213	67	73		
JYZC200L2-2	37	90.5	90.5	1.7	2.0	1.0	483	530	80	87		
200L2-6	22	89.0	90.0	1.7	2.0	1.0	298	318	77	83		
JYZC225S-4	37	90.5	92	1.7	2.0	1.0	482	530	76	83		
225S-8	18.5	88.5	90.5	1.7	2.0	1.0	243	267	67	73		
JYZC225M-2	45	91.0	91.0	1.7	2.0	1.0	578	636	80	87		
225M-4	45	91.5	92.5	1.7	2.0	1.0	578	636	76	83		
225M-6	30	89.5	91.0	1.7	2.0	1.0	387	426	77	83		
225M-8	22	89.0	90.5	1.7	2.0	1.0	289	318	77	83		
JYZC250M-2	55	91.5	92.0	1.7	2.0	1.0	722	794	81	88		
250M-4	55	91.5	92.5	1.7	2.0	1.0	722	794	78	84		
250M-6	37	90.5	91.0	1.7	2.0	1.0	482	530	78	84		
250M-8	30	89.5	91.5	1.7	2.0	1.0	387	426	78	84		
JYZC280S-2	75	91.5	92.5	1.7	2.0	1.0	965	1062	83	96		
280S-4	75	92.0	93.0	1.7	2.0	1.0	965	1062	78	84		
280S-6	45	91.0	92.0	1.7	2.0	1.0	576	636	78	84		
280S-8	37	90.0	91.5	1.7	2.0	1.0	482	530	78	84		
JYZC280M-2	90	92.0	92.5	1.7	2.0	1.0	1207	1328	83	90		
280M-4	90	92.5	93.5	1.7	2.0	1.0	1207	1328	78	84		
280M-6	55	91.0	92.0	1.7	2.0	1.0	722	794	78	84		
280M-8	45	90.5	92.5	1.7	2.0	1.0	578	636	78	84		
JYZC315S-2	110	92.5	92.5	1.7	2.0	1.0	1441	1585	84	91		
315S-4	110	92.5	93.5	1.7	2.0	1.0	1441	1585	81	88		
315S-6	75	91.5	92.5	1.7	2.0	1.0	965	1062	79	85		
315S-8	55	91.0	92.5	1.7	2.0	1.0	722	794	79	85		
JYZC315M-2	132	92.5	93.0	1.7	2.0	1.0	1696	1865	87	94		
315M-4	132	93.0	94.0	1.7	2.0	1.0	1696	1865	86	93		
315M-6	90	92.0	93.0	1.7	2.0	1.0	1207	1328	79	85		
315M-8	75	91.5	92.5	1.7	2.0	1.0	965	1062	79	85		
JYZC315L1-2	160	92.5	93.5	1.7	1.9	1.0	2075	2282	87	94		

续表

型 号	功率 (kW)	效率 (%)		堵转转矩/ 额定转矩	最大转矩/ 额定转矩	最小转矩/ 额定转矩	堵转电流 (A)		空气噪声 (声功 率级) (dB)		结构噪声 (振动加速度级平均值) (dB)	
		防滴外壳	防溅外壳				防滴外壳	防溅外壳	防滴结构	防溅结构		
315L1-4	160	93.0	94.5	1.7	1.9	1.0	2075	2282	86	93	水面舰艇 用电动机 为 135	潜艇用电 动机为 130
315L1-6	110	92.0	93.5	1.7	1.9	1.0	1441	1585	79	85		
315L1-8	90	91.5	93.0	1.7	1.9	1.0	1207	1328	79	85		
JYZC315L2-2	200	92.5	93.5	1.7	1.75	1.0	2622	2884	87	94		
315L2-4	200	93.0	94.5	1.7	1.75	1.0	2622	2884	86	93		
315L2-6	132	92.0	93.5	1.7	2.0	1.0	1696	1865	84	91		
315L2-8	110	91.5	93.0	1.7	2.0	1.0	1441	1585	79	85		

3.2.3 JYZ-H 系列扬弹机用舰用起重三相异步电动机

该系列三相异步电动机适用于水面舰船扬弹机用驱动电动机,也可用于频繁起动、制动及正反转的机械传动。非轴伸端带有直流圆盘式电磁制动器,为 60min 短时作制。使用环境温度为-10℃~+50℃,满足 GJB 69A—1997《舰用电机通用规范》的有关规定。

该系列电动机是专为新型先进的扬弹机研制的专用电动机。新型扬弹机提高了扬弹能力和速度,但国内现有的 JZ₂-H、YZ-H 型船用起重三相异步电动机无法满足新型扬弹机的实际工况,没有与此配套的其他电动机。

与 JZ₂-H 和 YZ-H 系列电动机相比,该系列电动机的特点为:

(1) 工作时间长,单速电动机延长至 2 倍,双速电动机延长至 3 倍,起动次数大大提高,而且为满载起动。由于频繁起动,必然引起电动机温升提高。

(2) 制动时间降低很多,尤其是双速电动机,要求在高速级也能制动。要降低制动时间,就得提高制动力矩,而制动力矩的提高势必延长释放时间,即延长电动机的堵转时间。

为此,该系列电动机经过反复电磁计算,找出最佳参数的方案;提高转子导体电阻率,转子导条采用黄铜条,电阻系数达 0.090 8Ω·mm²/m;在机座上增加散热箱,即增加散热面积;定子绕组端部用绝缘性能良好而导热效果较好的填充料包封,使端部的热量能传递出来;采用冷轧矽钢片,以降低铁耗。通过上述措施降低电动机温升。降低制动时间的措施为:反复进行电磁计算,找出最佳时间常数(即 RL 常数),以减小制动器的动作时间;增加制动力矩(但制动力矩的增加要延长制动器的释放时间,即增加电动机的堵转时间而使电动机的温升增加);加工工艺及材料保证质量(如压缩弹簧的长度、刚度、弹簧精度、电磁铁及衔铁材料等);由于频繁起动、制动,制动片必然容易磨损,因此该电动机制动器把摩擦片改为摩擦块,当摩擦块磨损后很容易调换。

该系列电动机温升考核为:单速电动机在满负载情况下,运行 4s,停 2s 工况连续运转 60min;双速电动机在高速挡为满载情况下,按快速挡运行 1.5s,慢速挡运行 2.5s,停 2s 工况连续运行 60min。运行曲线如图 2.1-11、图 2.1-12 所示。

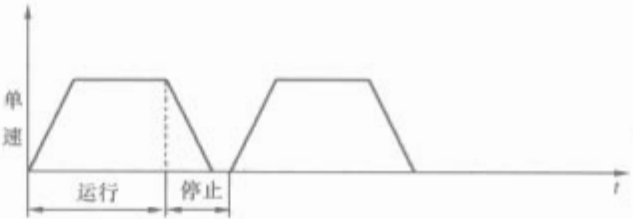


图 2.1-11 单速电动机温升试验工况

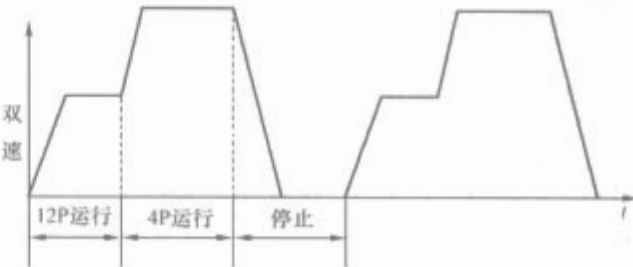


图 2.1-12 双速电动机温升试验工况

运行时,制动器与电动机同时通电。制动时,电动机与制动器同时断电。所谓运行,即电动机通电时间,它包括电动机的起动时间及平稳运行时间。所谓停止,即电动机断电时间它包括电动机制动时间及电动机静止时间。

该系列电动机的额定电压为 380V,额定频率为 50Hz。

JYZ-H 系列扬弹机用舰用起重三相异步电动机的主要技术数据见表 2.1-27。该系列电动机企业标准为 Q/OAH·510·026—2003《扬弹机用舰用起重三相异步电动机规范》。

表 2.1-27 JYZ-H 系列扬弹机用舰用起重三相异步电动机主要技术数据

型号	功率 (kW)	工作 时间 (min)	起动 频率 (次/min)	效率 (%)	功率因数	堵转转矩/ 额定转矩	最大 转矩/ 额定 转矩	最小 转矩/ 额定 转矩	起动 电流/ 额定 电流	制动 时间 (s)	外形尺寸 (mm)	
											中心高	总长
JYZ 132S-4-H	1.5	60	10	74	0.77	2.2	2.2	1.3	5.5	≤0.3	132	480
JYZ 132M-4-H	2.2	60	10	75	0.78	2.2	2.2	1.3	5.5	≤0.3	132	480
JYZ 132L-4-H	3.7	60	10	76	0.79	2.2	2.2	1.3	5.5	≤0.3	132	510
JYZ 160M1-4-H	5.5	60	10	77	0.81	2.2	2.2	1.3	5.5	≤0.3	160	530
JYZ 160M2-4-H	7.5	60	10	78	0.81	2.2	2.2	1.3	5.5	≤0.3	160	580
JYZ 160M-4/12-H	3/1.1	60	10	75/53	0.80/0.38	1.9/1.7	2.1/1.7	1.3/1.3	5.5/2.5	≤0.3	160	570
JYZ 160L-4/12-H	4/1.5	60	10	76/54	0.81/0.43	1.9/1.7	2.1/1.7	1.3/1.3	5.5/2.5	≤0.3	160	615
JYZ 180-4/12-H	6.3/2.2	60	10	77/55	0.83/0.45	1.9/1.7	2.1/1.7	1.3/1.3	5.5/2.5	≤0.3	180	740

4 船用直流电机

船用直流电机是指在海洋、内河航行的船舶、舰艇上使用的各种直流电机。船用直流电机的基本性能随船舶或舰艇性质的不同，应该分别符合中国船级社《钢级海船入级与建造规范》或国军标《舰船通用规范》(GJB 4000)、《舰船用直流电机通用规范》(GJB 1447) 等标准的有关规定。

通常船用直流电机是按上述船规或舰规要求，并考虑到船只或舰艇上具体电机的技术性能指标，从普通直流电机的标准系列中通过派生设计而产生的产品。

与普通直流电机相比较，船用直流电机的运行环境十分恶劣，因此在电机设计的过程中，应采取有效的措施以满足其特殊的技术要求，这些要求对于各种船用直流电机来说是相同的。其技术要求及措施主要有：

(1) 防水、防潮、防霉、防盐雾要求。船用直流电机的金属零部件除要求本身具有较好的防蚀性能外，均应有镀层或油漆被覆；带电零件之间或对地之间应有足够的爬电距离；选用防潮、防霉性能优异的绝缘材料，定子与电枢必须经严格的绝缘处理，表面喷耐潮、耐霉的覆盖漆；出线盒、机座与端盖等结构件的接缝处及转动部分应根据电机防护等级需要采用相应型式的防水结构；最后要根据产品技术规范的要求通过防潮、防霉、防盐雾和防水试验；对 24kW 及以上的发电机或特殊场所的电动机，根据需要可在定子内安装驱潮加热器。

(2) 耐冲击、振动和倾斜摇摆要求。船舶、舰艇的航行经常会处在冲击、振动、颠簸和倾斜摇摆状态下，因此电机的结构材料应采用钢质或其他高强度材料。电机结构应有足够的刚度，满足纵倾的要求。各紧固零件应有止动装置。

(3) 良好换向性能要求。船用直流电机对换向性能的要求高于普通直流电机。对一般用途的船用直流电机，连续定额电机从空载（不允许空载的电机从 1/4 负载）到额定负载的所有情况下，换向火花等级应不超过 $1\frac{1}{4}$ 级；在短时过电流或过转矩时，换向火花等级应不超过 $1\frac{1}{2}$ 级。短时定额或断续定额电机从空载到额定负载的所有工况下，换向火花等级应不超过 $1\frac{1}{2}$ 级。2 级火花仅在电机直接起动（无起动变阻器）或逆转瞬间，且换向器及电刷的状态仍能适用以后正常工作时允许出现。

(4) 绕组绝缘电阻的要求。额定电压 500V 及以下的电机，各绕组的冷、热态绝缘电阻修正到 25℃（按照温度每减少 15℃，绝缘电阻增加一倍修正），应不低于表 2.1-28 规定的限值。

表 2.1-28 绝缘电阻限值			
电机部位	磁场绕组 (B、F、H 级)	电枢绕组 (B、F、H 级)	加热器
绝缘电阻 (MΩ)	50	50 (额定功率≤750kW/kVA) 25 (额定功率>750kW/kVA)	25

(5) 轴电流的要求。船用直流电机的设计应使轴与轴承间无破坏性电流流过，一般轴电压的电压峰值不应超过 1V。如果轴承已采取电气绝缘，则允许有较高的轴电压。

(6) 抑制无线电干扰要求。船用直流电机要求有良好的电磁兼容性，除提高对换向性能要求外，还经常附加滤

波装置以防止宽频带射频对无线电信号或微电子线路的干扰。滤波电容器的接地电容量应尽量小，而且应采用带熔断丝的穿心式电容器，防止一旦介质击穿造成电机机壳带电的危险。电容器通常安装在电机接线盒内。为获得满意的抑制效果，常把电机的换向极绕组分成相同的两部分，对称接在电枢两端。滤波电容器的一般连接方法如图 2.1-13 所示。

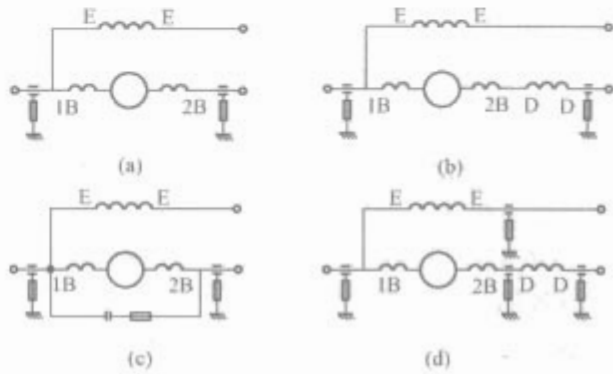


图 2.1-13 滤波电容器的一般连接方法
(a) 并励电机 1；(b) 并励电机 2；(c) 复励电机 1；
(d) 复励电机 2

船用直流电机有船用直流发电机和船用直流电动机两类。按照其具体用途进行分类。目前常见的船用直流电机主要有：船用直流发电机、充电（调压）直流发电机、船用直流电动机、电力推进直流电动机、甲板机械直流电动机、幅压直流电动机等。

4.1 船用直流发电机

船用直流发电机是用于为船舶、舰艇的电力拖动装置或照明系统提供电源。

4.1.1 性能要求与运行特点

船用直流发电机的励磁方式通常采用复励式，也可采用带自动调压器的并励或带少量串励绕组的稳定并励式，为连续工作制。根据驱动原动机的转速变化情况，有恒速发电机和变速发电机两种。恒速发电机常用柴油机等转速相对稳定的动力驱动；而变速发电机主要由变速主轴带动，为得到较稳定的输出电压，应配置自动调压器使用。

外特性和电压调整率，随发电机采取的励磁方式不同，其要求如下：

(1) 50kW 及以上的并励或稳态并励发电机，当满载工作至额定电压时突然卸去负载，电机稳定空载电压应小于等于 115% 额定电压。同时无论空载或负载时调整电压，电压外特性曲线上任一点均不应发生电压随负载增加而上升或随负载减小而下降情况。

(2) 对复励发电机，考虑原动机的速度特性，转速应于满载时调整至发电机额定转速。此时，发电机在热态下应满足：

- 1) 在 20% 额定负载时，电压调整率应小于等于 ±1%。
- 2) 在满载时，电压调整率应小于等于 ±2.5%。
- 3) 在 20% 额定负载至满载间，电压调整率应小于等于 ±4%。

(3) 仅作励磁机用发电机，电压调整率不做要求。

电压脉动率，发电机在从空载到额定负载间的负载下，在 0~16kHz 的频率时，电压脉动率均应不大于 2%。电压脉动率按式 (2.1-8) 计算。电压脉动波形如图 2.1-14 所示。

电压脉动率 = $[(E_{\max} - E_{\min}) / E_o] \times 100\%$ (2.1-8)

式中： E_{\max} 为脉动电压最大值，V； E_{\min} 为脉动电压最小值，V； E_0 为平均直流电压，V。

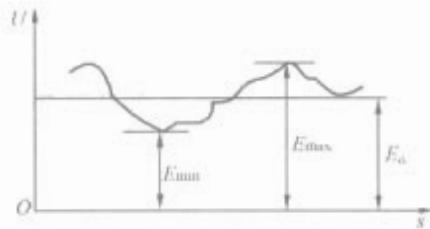


图 2.1-14 电压脉动波形

电流短时过载要求，在额定转速和额定电压下，能够承受 1.5 (1.8) 倍额定电流历时 2min (1min)。

对变速发电机还应满足：

1) 当发电机在设计的转速范围内变化时，输出电压应保证受电设备仍能力可靠工作。

2) 在额定转速 75%~100% 范围内，发电机应能够输出额定功率。

4.1.2 设计特点

发电机设计基本是参照普通系列直流发电机的电磁参数，结合船舰规范的要求进行电磁和工艺方案调整，应着重于对发电机换向、绕组温升、绝缘性能及抑制无线电干扰等方面进行改进。采取较低换向电抗电势，控制换向区域宽度不超过 75% 中性区宽度，换向器尽量采取多片结构以减小其片间电压，电枢绕组避免使用虚元件。考虑到拖动原动机的转速变化率，设计的发电机空载转速应比满载转速高 5% 左右。发电机的结构设计，应有足够的强度。出线盒为水密结构，接线盒内须加装滤波电容器。刷握采用恒压式，保证产品满足冲击、振动等试验的要求。

4.1.3 典型型号及规格

船用直流发电机主要有 Z2C、ZFH 等系列产品，典型型号及规格见表 2.1-29。

表 2.1-29 船用直流发电机典型型号及规格

型 号	技 术 参 数		
	额定转速 (r/min)	额定电压 (V)	额定功率 (kW)
Z2C 系列	1450	115	0.7~26
		230	0.7~185
Z2C 系列 (变速)	1450/1700	115	3.5
	1450/2100		9、15
			230
ZFH 系列	600、750、1500	230	110、135、170、250
	600、410	460	170、410

4.2 充电（调压）直流发电机

充电（调压）直流发电机是用作为船舶或舰艇的蓄电池充电及浮充供电。

4.2.1 性能要求与运行特点

该发电机采用并励式励磁方式。通过调节励磁电流大小，使输出电压在一定范围内变化，其外特性曲线具有下降特性。发电机额定转速一般为 1450r/min，电压等级有 24/36V、48/72V、60/90V、110/160V、220/320V 等。在平均电压为 30V、60V、75V、135V、270V 下能够输出额定电流时的功率称为额定功率。当电压在平均电压与上限电压之间时，输出功率应不大于额定功率，在平均电压与下限电压

之间时，输出电流应不大于额定电流。上限电压与最大电流的乘积为计算功率，其值比额定功率约大 20% 左右。

4.2.2 设计特点

充电直流发电机磁路在下限电压时，设计应留有一定的饱和度，以保证发电机能够稳定工作。而在上限电压时，则较高的气隙和电枢齿部的磁通密度。由于该发电机运行时最大电流与上限电压不会同时出现，因此电枢热负荷及励磁绕组的电流密度可以选取较高的数值。为使发电机能够按照蓄电池的充电电压特性平滑地调节输出电压。应根据发电机的空载和负载特性曲线配置适当的磁场变阻器，保证每极的电压调节量不超过平均电压的 3%。

充电发电机在结构上没有特殊要求，可按普通船用直流发电机的标准系列进行派生。

4.2.3 典型型号及规格

目前充电（调压）直流发电机主要有 ZHC2-H 和 Z2C 两种系列产品，典型型号及规格见表 2.1-30。

表 2.1-30 充电（调压）直流发电机典型型号及规格

型 号	技 术 参 数		
	额定转速 (r/min)	额定电压 (V)	额定功率 (kW)
ZHC2-H 系列	1450	24/36	1、1.5、2.1、4、7.5、12、15
		48/72	7.5、12
		69/90	4、7.5、15、20、22.5、40
Z2C 系列	1450	100/160	0.6~30 范围内 14 种规格
		220/320	0.6~160 范围内 20 种规格

4.3 船用直流电动机

船用直流电动机主要用于船舶、舰艇的泵、风机等各种辅机的电力拖动。

4.3.1 性能要求与运行特点

船用直流电动机的励磁方式通常采用带少量串励绕组的稳定并励式，负载特性一般要求电动机恒速运行，工作制为连续定额。电动机的电刷置于中性线时，在额定负载和励磁电流为额定值情况下，电动机正反两个转向的转速差应不得超过两者的算术平均值的 5%。电动机的转速调整率应为正值，即负载增大转速至少应略有下降，保证机组能够稳定运行。

转速调整率，在励磁绕组接近工作温度，由满载逐渐调节到空载及保持电压不变时，应不超过表 2.1-31 的规定。

表 2.1-31 船用直流电动机的转速调整率

功率折算到 1000r/min 的千瓦数	<0.67	≥0.67~2.5	≥2.5~10	≥10
转速调整率 (%)	+18 0	+15 0	+12 0	+10 0

转速容差，在电动机满载和工作温度时应不超过表 2.1-32 的规定。

表 2.1-32 船用直流电动机的转速容差

功率折算到 1000r/min 的千瓦数	<0.67	≥0.67~2.5	≥2.5~10	≥10
转速容差 (%)	±15	±10	±7.5	±5

短时过转矩，在电动机热态和逐渐增加转矩时，能够承受 1.6 倍额定转矩历时 2min。

4.3.2 设计特点

除不需考虑转速变化率对空载转速的影响外，船用直流电动机的电磁及结构设计特点同前述第 4.1.2 节中船用直流发电机的内容相同。

4.3.3 典型型号及规格

船用直流电动机主要有 Z2C、ZDH、HZ 等系列产品，主要技术数据见表 2.1-33。

表 2.1-33 船用直流电动机主要技术数据

型 号	额 定 转 速 (r/min)	额 定 电 压 (V)	额 定 功 率 (kW)
Z2C 系列	600、750、1000、 1500、3000	110	0.4~40
		220	0.4~200
ZD 系列	250、320、350、 600、700	192、220、330、440、 450、500	160~370
HZ 系列	2200、2400、2880	170、330、440	15~50

4.4 电力推进直流电动机

电力推进直流电动机作为舰船主推进、应急推进或经济航行推进电动机。

4.4.1 运行与结构特点

主推进电机为双电枢、滑动轴承结构，经济航行推进电机为单电枢、滑动轴承结构。机座均分为上下两部分组成，有利于拆装维修。除个别型号电机轴承采用循环润滑外，其他均为自润滑结构。该系列电机运行特点是调速范围广、可靠性高，防潮、防霉、防震能力强，保证在倾斜、摇摆及冲击状态下正常运行。

4.4.2 典型型号及规格

电力推进用直流电动机主要为 HZ 系列产品，主要技术数据见表 2.1-34。

表 2.1-34 电力推进用直流电动机技术数据

型 号	额 定 转 速 (r/min)	额 定 电 压 (V)	额 定 功 率 (kW)
HZ-1、6、7、10	420、800、530、 200	200、240、380、 770	993、342、2574、 4412
HZ-3、8	420	215、220	36.8、51.5

4.5 甲板机械直流电动机

甲板机械直流电动机适用于在舰船露天甲板及甲板舱室内的起重机、起货机、绞车等。

4.5.1 性能要求与运行特点

电动机的励磁有串励、复励与并励，工作方式为断续周期工作制，也可按需要制成其他断续周期工作制或短时工作制。断续周期工作制时，并励绕组的负载持续率应为 100%。

电动机能够承受快速而频繁的起制动和正反转。在负载持续率为 S3-25% 时，应具有串励 3.5 倍、复励 3 倍和并励 2.8 倍以上的转矩过载能力。在 S3-25% 时，允许对并励电动机以弱磁方式调速至 2 倍的额定转速，此时最大转矩应不小于 0.8 倍额定转矩；允许对并励及复励电动机以提高电压（最高不超过 440V）方式调速至 2 倍的额定转速，此时（保持额定励磁不变）的最大转矩应不小于 1.5 倍额定转矩。

4.5.2 设计特点

为使电动机满足性能所要求的过载能力，电动机磁路的磁通密度及各绕组的电流密度应尽量选取较低数值，同时还应注意保证电机在额定与过载时均有良好的换向性能。

在结构方面，电动机非轴伸端可安装直流电磁制动器。制动器应为失电压制动方式，并具有人工释放装置，在不通电时可人工释放，转子即能自由转动。对于安装在露天甲板场所的电动机，外壳防护等级应为 IP56（防水式）以上；而在甲板舱室内的电机，外壳防护等级应为 IP44（防溅式）以上。所安装的制动器外壳防护等级要求应与电动机相一致。接线盒的防护等级为 IP56，电缆入口处设有密封填料函，其盖板应为水密结构。电动机的端盖上轴承盖处有特殊设计的防水结构。转轴必须采用优质结构钢，换向器为 V 型钢结构。

4.5.3 典型型号及规格

目前，甲板机械用直流电动机产品主要为 ZZY-H 系列，主要技术数据见表 2.1-35。

表 2.1-35 甲板机械直流电动机技术数据 (S3-25%)

型 号	额 定 转 速 (r/min)	额 定 电 压 (V)	额 定 功 率 (kW)
ZZY-H 系列（低速）	600~1300	220	3~23
ZZY-H 系列（高速）	850~1750	220	5.5~30

4.6 幅压直流电动机

幅压直流电动机适用于蓄电池组供电的潜艇电力推进和泵、风机、压缩机等辅助设备驱动的场所。

4.6.1 性能要求与运行特点

根据蓄电池组的供电特点，在其放电周期前后提供给电动机的电压值变化幅度较大，常见有 320/220V、320/220/175V、640/440/350V 几种变化范围。这样在上限电压供电时，电动机过高的转速会使电机和所驱动的设备严重过载；而下限电压时，转速太低将影响驱动设备的功能或造成电机自身起动困难，因此要求幅压直流电动机在电压大幅度变化时，相应电机的转速变化应较小，以保证电动机在电压变化范围能正常工作，励磁方式为并励或复励。

幅压直流电动机的换向性能比其他船用电机要求严格，具体为：

- 1) 电压为 220V 和 440V 时，从空载至额定负载的所有情况，火花应为 1 级。
- 2) 电压为 175V、320V、350V 和 640V 时，火花应不大于 1 1/4 级。
- 3) 短时过转矩运行时，火花应不大于 1 1/2 级。
- 4) 整流电源供电时（460~640V），火花应不大于 1 1/4 级。

4.6.2 设计特点

在设计选取电磁参数时，一般采用较大的主极气隙，使气隙磁压降占磁路总磁压降的 80%~90%。在上限电压工作点，幅压电机各段磁路的磁通密度和励磁绕组电流应为最大，设计中应注意合理选择各电磁参数，然后再校核中间与下限电压工作点。在对起动性能有特殊要求的场合，可再增加一套起动绕组，由于该绕组仅在电动机起动时使用，其电流密度可取正常数值的 3~4 倍。换向器尽量采取多片结构并减少电枢每元件匝数，以改善换向火花。

4.6.3 典型型号及规格

幅压直流电动机主要为 ZYF、Z2C 等系列产品,其基本技术参数见表 2.1-36。

表 2.1-36 幅压直流电动机技术数据

型 号	额 定 转 速 (r/min)	额 定 电 压 (V)	额 定 功 率 (kW)
ZYF 系列	1150/1450~2200/3100	350/640~440/640	6.3/9.3~75/85
Z2C 系列	1250/1850~2600/3300	175/320	1.42/4~14/27

5 船用电机标准信息

我国船电标准化工作是从 20 世纪 60 年代正式开始的,当时,主要以前苏联 ГЭК-49 舰艇电气设备规范和我国钢质海船建造规范及各国有关船电标准为参考资料,编制了船电电气设备冲击、振动、噪声和无线电干扰端子电压 4 项试验方法和考核标准及 JO2-H 系列船用小型异步电动机标准,由原一机部批准内部使用。20 世纪七八十年代开始,随着我国船用产品的不断开发,加上我国实行改革开放政策,开始关注并跟踪 IEC 标准和美国 MIL 标准,并组织人力翻译出版了 IEC92 号出版物和相关 MIL 标准,在此基础上,编制了《船用电机基本技术要求》、《舰用电机通用规范》等大量舰用、船用电机产品标准和《船用电气设备振动(正弦)试验方法》、《军用设备环境试验方法》、《船舶电气与电子设备的电磁兼容》等环境试验方法。90 年代开始,一方面根据舰船配套电机产品的开发,新制订了一批船电标准;另一方面根据新的使用需求和 IEC、MIL 标准的新动态及相关陆用标准的修改,对原先制订的标准陆续进行了修订。同时,根据国家有关标准主管部门的安排,对国家(军用)标准、行业(军用)标准进行了清理、整顿,废止了一部分标准,调整了一部分标准的类别。现将目前为止现行有效的标准信息述列如下,供大家参考使用。

(1) 基础类标准:

GB/T 4942.1—2006 旋转电机整体结构的外壳防护等级(IP 代码) 分级

GB/T 4988—2002 船舶和近海装置用电工产品的额定频率 额定电压 额定电流

GB/T 6994—2006 船舶电气设备一般规定

GJB 747—1989 舰船电气设备外壳基本技术条件

GJB 4000—2000 舰船通用规范

中国船级社 钢质海船入级规范 2006 年版

(2) 产品类标准:

GB/T 7060 船用旋转电机基本技术要求

GB/T 12975 船用同步发电机通用技术条件

GJB 69A—1997 舰用电机通用规范

GJB 70—1985 舰用直流幅压电动机规范

GJB 75A—1997 舰用三相同步发电机通用规范

GJB 812A—2008 舰用三相异步电动机通用规范

GJB 1447—1992 舰船用直流电动机通用规范

GJB 5248—2003 舰用低噪声三相异步电动机通用规范

JB/T 4123—1999 船舶和海上石油平台用 312.5kVA~3125kVA 三相同步发电机技术条件

JB/T 4271—1999 船用三相交流无刷发电机技术条件

JB/T 4401.1—1999 船用小型单相同步发电机技术条件

JB/T 4401.2—1999 船用小型三相同步发电机技术条件

JB/T 5273—2002 Y-H 系列(IP44) 船用三相异步电动机技术条件(H80~H355)

JB/T 5798—1991 船用直流电机技术条件

JB/T 5800—2002 Y-H 系列(IP23) 船用三相异步电动机技术条件(H160~H315)

JB/T 7567—2005 船用稳索绞车三相异步电动机技术条件

JB/T 7596—1994 船用充电发电机技术条件

JB/T 7597—2006 YZ-H 系列船用起重三相异步电动机技术条件

(3) 环境试验类标准:

GB/T 2423.1—2001 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 A 低温试验

GB/T 2423.2—2001 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 B 高温试验

GB/T 2423.4—1993 电工电子产品基本环境试验规程 试验 Db: 交变湿热试验方法

GB/T 2423.16—1999 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 J 和导则: 长霉

GB/T 2423.17—1993 电工电子产品基本环境规程 试验 Ka: 盐雾试验方法

GB/T 7094—2002 船用电气设备振动(正弦)试验方法

GB/T 10250—2007 船舶电气与电子设备的电磁兼容

GJB 150—1986 军用设备环境试验方法

GJB 151A—1997 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求

GJB 152A—1997 军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量

HJB 34—1990 舰船电磁兼容规范

ZJB K 34002—1986 舰用电气设备 振动(正弦)试验方法

ZJB K 04017—1990 舰用电气设备 冲击 试验方法

ZJB K 61028—1991 舰用电气设备 颠簸 试验方法

JB/T 4159—1999 热带电工产品通用技术要求

(4) 相关的陆用电机标准:

GB 755—2000 旋转电机 定额和性能

GB/T 997—2003 旋转电机结构及安装型式(IM 代号)

GB/T 1029—2005 三相同步电机试验方法

GB/T 1032—2005 三相异步电动机试验方法

GB/T 1311—1989 直流电机试验方法

GB/T 1971—2006 电机线端标志与旋转方向

GB/T 1993—1993 旋转电机冷却方式

GB 10068—2000 轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动 振动的测量 评定及限值

JB/T 5810—1991 电机磁极线圈及磁场绕组匝间绝缘试验规范

JB/T 5811—1991 交流低压电机成型绕组匝间绝缘试验方法与限值

JB/T 9615.1—2000 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验方法

JB/T 9615.2—2000 交流低压电机散嵌绕组匝间绝缘试验限值

JB/T 9617—1999 直流电机电枢绕组匝间绝缘试验规范

第 2 章 船 用 电 器

1 概述

1.1 船用低压电器的主要类别

船用低压电器的用途广泛，种类繁多。从应用场所提出的不同要求，在船舶电力系统中所处的地位和作用的不同，可以分成配电电器和控制电器两大类。

配电电器包括刀开关、刀形转换开关、熔断器、断路器，控制电器包括控制器继电器，接触器、起动器、主令电器、电阻器、变阻器、控制继电器、电磁铁。

1.2 船用低压电器的分类与用途

船用电器的分类及用途见表 2.2-1。

表 2.2-1 船用电器的分类及用途

分类名称	主 要 品 种	用 途
配 电 电 器	断路器	万能式空气断路器 塑料外壳式空气断路器 限流式断路器 直流快速断路器 灭磁断路器 用作船舶交直流线路的过载、短路、欠电压保护，也可用于不频繁通断电路操作。灭磁断路器用于发电机励磁电路保护
	熔断器	有填料封闭管式熔断器 保护半导体器件快速熔断器 无填料密闭管式熔断器 自复熔断器 用作船舶交直流线路和设备的短路和过载保护
	刀开关	熔断器式刀开关 大电流刀开关 负荷开关 用作电路隔离，也能接通与分断电路额定电流
	刀形转换开关	组合开关 换向开关 电磁转换开关 主要作为两路及以上电源或负载的转换和通断电路用
控 制 电 器	接触器	交流接触器 直流接触器 真空接触器 半导体接触器 用作远距离频繁地起动或控制交、直流电动机以及接通分断正常工作的主电路和控制电路
	控制继电器	电流继电器 电压继电器 时间继电器 中间继电器 热过载继电器 温度继电器 在控制系统中，作控制其他电器或作主电路的保护之用
	起动器	电磁起动器 手动起动器 自耦减压起动器 Y-△起动器 用作交流电动机的起动或正反向控制
	控制器	凸轮控制器 平面控制器 用于电气控制设备中转换主电路或励磁回路的接法，以达到电动机起动，换向和调速
	主令电器	按钮 限位开关 微动开关 万能转换开关 用作接通，分断控制电路、以发布命令或用作程序控制

续表

分类名称	主 要 品 种	用 途
控 制 电 器	电阻器	铁基合金电阻器 用作改变电路参数或变电能 为热能
	变阻器	励磁变阻器 起动变阻器 频敏变阻器 用作发电机调压以及电动机 的平滑起动和调速
	电磁铁	起重电磁铁 牵引电磁铁 制动电磁铁 用于起重操纵或牵引机械 装置

1.3 正常工作条件

船用电器中民船用低压电器和军船用低压电器其正常工作条件是有区别的，以下分别叙述。

1.3.1 民船用电器正常工作条件

民船用电器应在表 2.2-2 规定的条件下正常工作。

表 2.2-2 民船用电器的正常工作条件

环 境 因 素	正常工作环境条件
周围空气温度最高值	+40℃、+45℃ ^①
周围空气温度最低值	-5℃、-25℃ ^②
海上潮湿空气影响	有
盐雾影响	有
油雾影响	有
霉菌影响	有
倾斜	≤22.5°
摇摆	≤22.5°
振动	有
冲击	有 ^③

- ① +40℃主要适用于沿海、内河船舶用的船用电器。对于高于+45℃的场所应作特殊考虑。
- ② 主要使用于安装在露天甲板及无保温措施的露天甲板舱室内的船用电器。对于低于-25℃的场所应作特殊考虑。
- ③ 指船舶正常营运时产生的冲击。

1.3.2 舰用电器正常工作条件。

舰用电器应在表 2.2-3 规定的条件下正常工作。

表 2.2-3 舰用电器正常工作条件

环 境 条 件	正常工作环境条件
环境空气温度最高值	+50℃
	+45℃（常规潜艇）
环境空气温度最低值	0℃（机舱）
	-10℃（一般舱室）
	-25℃（无保温措施的露天甲板舱室）
海上潮湿空气影响	有
盐雾影响	有
油雾影响	有
霉菌影响	有
倾斜	≤30°
摇摆	≤45°
振动	有
冲击	有
颠簸	有（仅对快艇）

注 对于潜艇电器尚应考虑 60°短时摇摆的影响。

1.3.3 电源条件

民船用和舰船用电器应在下列规定的电压和频率变化范围内正常工作：

- (1) 交流电源的电压变化为额定电压的+6%~ -10%，频率变化为±5%。
- (2) 直流电源的电压变化为额定电压的±10%。
- (3) 蓄电池电源电压的变化为额定电压的±20%（蓄电池充电电压的上限值为额定电压的130%，放电电压的下限值为额定电压的75%）。

1.4 污染等级

污染等级与电器使用所处的环境条件有关。

污染等级1：无污染或仅有干燥的非导电性污染。

污染等级2：一般情况下仅有非导电性污染，但必须考虑到偶然由于凝露造成短暂的导电性。

污染等级3：有导电性污染，或由于凝露使干燥的非导电性污染变为导电性的。

污染等级4：造成持久性的导电性污染，例如由于导电尘埃或雨雪所造成的污染。

民船用电器和舰船用电器的污染等级一般不能低于3级，除非采取措施（如安装在外壳内）改善电器的微观环境条件。

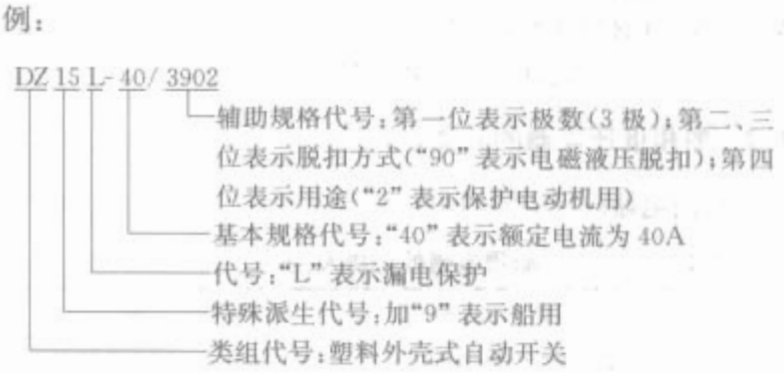
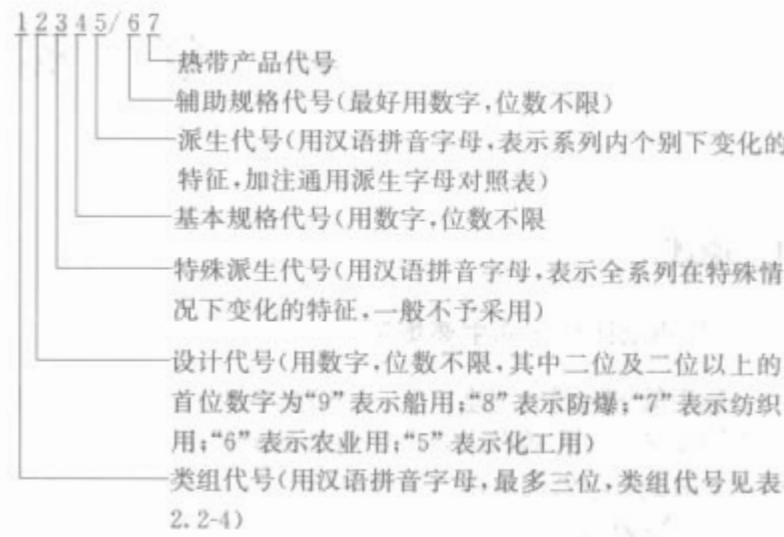
1.5 型号编制方法

1.5.1 低压电器的型号编制方法

产品型号代表一种类型的系列产品，但不包括该系列产品的若干派生品种。产品全型号系指在产品型号之后附加规格代号（如电流、电压或容量数值等），以及其他数字或字

母等，以确定某一产品规格及其派生特征。

全型号组成型式如下：



类组代号与设计代号的组合，表示产品的“系列”，类组代号的汉语拼音字母方案的首二位规定见表2.2-4。如还需要三位的类组代号，其第三位字母在编制具体型号时，以不重复为原则，临时拟定。

表 2.2-4 低压电器产品型号类组代号表

代号	H	R	D	K	C	Q	J	E	Z	B	T	M	A
名称	刀开关和刀形转换开关	熔断器	自动开关	控制器	接触器	起动器	控制继电器	主令电器	电阻器	变阻器	调整器	电磁铁	其他
A						按钮式		按钮					
B									板形元件				触电保护器
C		插入式				电磁式			冲片元件	旋臂式			插销
D	刀开关						漏电		铁铬铝带型元件		电压		信号灯
E													
F													
G				鼓形	高压				管形元件				
H	封闭式负荷开关	汇流排式											接线盒
J					交流	减压		接近开关					
K	开启式负荷开关				真空			主令控制器					
L		螺旋式					电流			励磁			电铃
M		密闭管式	灭磁		灭磁								
N													
P				平面	中频					频敏			
Q										起动		牵引	
R	熔断器式刀开关						热		非线性电力电阻				

续表

代号	H	R	D	K	C	Q	J	E	Z	B	T	M	A
S	刀形转换开关	快速	快速		时间	手动	时间	主令开关	烧结元件	石墨			
T		有填料 封闭管式		凸轮	通用		通用	足踏开关	铸铁元件	起动调速			
U						油浸		旋钮		油浸起动			
W			框架式				温度	万能转换 开关		液体起动		起重	
X						星三角		行程开关	电阻器	潜线式			
Y	其他	其他	其他	其他	其他	其他	其他	其他	硅碳 电阻元件	其他		液压	
Z	组合开关	自复	塑料 外壳式		直流	综合	中间					制动	

汉语拼音字母应根据下列原则之一选用：

- (1) 采用所代表对象名称的汉语拼音第一个音节字母。
- (2) 采用所代表对象名称的汉语拼音非第一个音节字母。
- (3) 万不得已时，再选用与发音毫不相关的字母。

新编型号的最基本原则是不重复，由于产品品种繁复，而汉语同声字母词汇很多，故不限制一个字母在任何地方只代表一个概念，但在可能条件下，应尽可能做到一个字母只代表一个概念。

1.5.2 船用低压电器的型号编制方法

船用低压电器的船用代号用数字 9 表示；即在低压电器设计代号前加数字 9，如 DW14 系列断路器的船用型号即为 DW914。

1.5.3 军用低压电器产品型号的编制方法

军用低压电器同样包括刀开关、刀形转换开关、熔断器、控制器、接触器、起动器、控制继电器、主令电器、电阻器、变阻器、调整器、电磁铁 12 大类，其中调整器(发电

机电压频率调整器)实际上已归入电机，增加一项“其他”，仍然是 12 大类。

产品全型号由产品型号和规格代号两部分组成，其表示形式及含义如下：



注：派生代号、辅助规格代号，视产品具体情况可省略其中一个或二个。

船用电器使用的字母代号见表 2.2-5。

表 2.2-5 船用电器使用的字母代号

代号	H	R	D	K	C	Q	J	L	Z	B	T	M	A
名称	刀开关和 刀形转换开关	熔断器	断路器	控制器	接触器	起动器	控制继电器	主令电器	电阻器	变阻器	调整器	电磁铁	其他
A						按钮式		按钮					
B									板形元件				
C		插入式				电磁式			冲片元件				
D	刀开关						漏电		铁铬铝带型元件		电压		指示灯
E													
F													
G									管形元件				
H													
J					交流	减压		接近开关					
K					真空			主令控制器					
L		螺旋式					电流			励磁			
M		密闭管式	灭磁		灭磁								
N													
P					中频					频率	频率		
Q										起动			

续表

代号	H	R	D	K	C	Q	J	L	Z	B	T	M	A
名称	刀开关和刀形转换开关	熔断器	断路器	控制器	接触器	起动器	控制继电器	主令电器	电阻器	变阻器	调整器	电磁铁	其他
R	熔断器式刀开关						热		非线性电力电阻				
S	刀形转换开关	快速	快速		时间	手动	时间	主令开关	烧结元件				
T		有填料封闭管式		凸轮	通用		通用	足踏开关		起动调速			
U						油浸		旋钮					
W			框架式				温度	万能转换开关					
X						星三角		行程开关	电阻器				
Y	其他	其他	其他	其他	其他	其他	其他	其他		其他		液压	
Z	组合开关	自复	塑料外壳式		直流	综合	直流					制动	

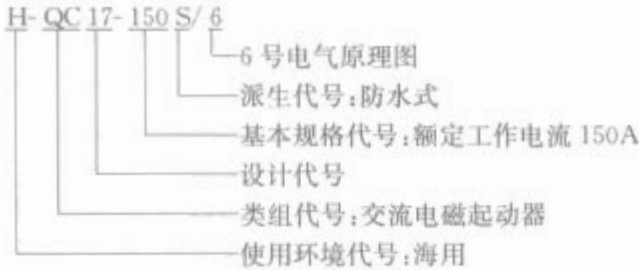
型号中派生字母及含义见表 2.2-6。

表 2.2-6 型号中的派生字母及含义

派生字母	代 表 含 义
A·B·C·D···	结构设计稍有改进或变化
G	插入式、抽屉式
J	交流、防溅式
Z	直流、防震、正向、重任务、自动复位
W	失压、无极性、出口用、无灭弧装置
N	可逆、逆向
S	三相、双线圈、防水式、手动复位、三个电源、有锁住机构
P	单相、电压的、防滴式、电磁复位、两个电源
K	开启式
H	保护式、带缓冲装置
M	灭磁、母线式、密封式
Q	防尘式、手车式
L	电流的、摺板式
F	高返回、带分励脱扣
X	限流

注 表中所列范围以外的加注派生字母,由申请型号单位提出建议并加以说明后,报产品归口单位审核批准。

产品全型号举例:



1.6 船用低压电器的主要标准

船用低压电器标准中的内容有很大一部分与低压电器专业标准有关,这类标准有的直接引用 IEC 的相关标准,有的与 IEC 相关标准协调一致,这类标准主要有:

- GB/T 4942.2—1993 低压电器外壳防护等级
- GB 6829—1995 剩余电流动作保护器的一般要求
- GB 8871—2001 交流接触器节电器
- GB 10963—1999 家用及类似场所用过电流保护断路器
- GB/T 12501.2—1997 电工电子设备按电击防护分类 第2部分:对电击防护要求的导则

- GB 13539.1—2002 低压熔断器
- GB 13539.2—1992 低压熔断器 专职人员使用的熔断器的补充要求
- GB 13539.3—1999 低压熔断器 非熟练人员使用的熔断器的补充要求 (主要用于家用和类似用途的熔断器)
- GB 13539.4—1992 低压熔断器 半导体器件保护用熔断体的补充要求
- GB 13539.5—1999 低压熔断器 第三部分:非熟练人员使用的熔断器的补充要求 (主要用于家用和类似用途的熔断器) 标准化熔断器示例
- GB/T 14048.1—2000 低压开关设备和控制设备 总则
- GB 14048.2—2001 低压开关设备和控制设备 低压断路器
- GB 14048.3—1993 低压开关设备和控制设备 低压开关、隔离器、隔离开关及熔断器组合电器
- GB 14048.4—1993 低压开关设备和控制设备 低压机电式接触器和电动机起动器
- GB 14048.5—2001 低压开关设备和控制设备 第5-1部分 控制电路电器和开关元件 机电式控制电路电器
- GB 14048.6—1998 低压开关设备和控制设备 接触器和电动机起动器 第2部分:交流半导体电动机控制器和起动器
- GB 14048.7—1998 低压开关设备和控制设备 辅助电器 第1部分:铜导体的接线端子
- GB 14048.8—1998 低压开关设备和控制设备 辅助电器 第2部分:铜导体的保护导体接线端子排
- GB 14048.9—1998 低压开关设备和控制设备 多功能电器(设备) 第2部分:控制与保护开关电器(设备)
- GB 14048.10—1999 低压开关设备和控制设备 控制电路电器和开关元件 第2部份:接近开关
- GB 16916.1—1997 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB) 第一部分:一般规则
- GB 16916.21—1997 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB) 第2.1部分:一般规则对动作功能与线路电压无关的 RCCB 的适用性
- GB 16916.22—1997 家用类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB) 第2.2部分:一般规则对动作功能与线路电压有关的 RCCB 的适用性
- GB 16917.1—1997 家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCBO) 第1部分:一般规则

GB 16917.21—1997 家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCBO)第21部分:一般规则对动作功能与线路电压无关的RCBO的适用性

GB 16917.22—1997 家用和类似用途的带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB)第22部分:一般规则对动作功能与线路电压有关的RCCB的适用性

GB/T 16935.1—1997 低压系统内设的绝缘配合 第一部分:原理、要求和试验

GB 17701—1999 设备用断路器

JG/T 2179—1999 组合开关

JB/T 2930—1991 低压电器 产品型号编制方法

JB/T 5809—1991 真空接触器截止电流测试方法

JB/T 6319—1992 电阻器基本技术要求

JB/T 6452—1992 电阻器基本技术要求

JB/T 6525—1992 电器安装轨

JB/T 7116—1993 模数化终端组合电器

JB/T 7122—1993 交流真空接触器基本要求

JB/T 7818—1995 电焊机用转换开关

JB 8589—1997 DZ20系列塑料外壳式断路器

JB 8590.1—1997 DW15系列万能式断路器

JB 8590.2—1997 DW16系列交流断路器

JB 8591.1—1997 CJ20系列交流接触器

JB 8590.2—1997 CJ26, CJ28系列交流接触器

JB 8591.3—1997 CJ40系列交流接触器

JB 8627—1997 热过载断路器

JB 8629—1997 隔离开关熔断器组

JB/T 8663—1997 倒顺开关

JB/T 8730—1998 CJT1系列交流接触器

JB 8755—1998 移动式剩余电流保护器

JB 8756—1998 剩余电流动作保护继电器

JB 8975—1999 低压信号灯

JB 8976—1999 熔断器式隔离开关

JB 8977—1999 刀形隔离器和刀形转换隔离器

JB 8978—1999 接触器式继电器

JB 8979—1999 带过载保护的漏电断路器

JB/T 8980—1999 灭弧罩陶瓷件及其材料

JB 10185—2000 开关熔断器组(负荷开关)

船用电器的主要标准有:

GB/T 3783—1994 船用低压电器基本要求

GB/T 6994—2006 船舶电器设备一般规定

GB/T 4942.2—2005 低压电器外壳防护等级

JB/T 2290—2007 船用低压接触器和交流电动机起
动器

JB/T 5776—2007 船用保护继电器

JB 5759—1991 船用主令控制器

JB/T 5796—2007 船用低压空气断路器

JB/T 5806—2005 船用双金属片式热过载继电器

JB/T 6329—2002 船用机电式控制电路电器

JB/T 6453—1992 DW914B系列船用万能式空气断
路器

JB/T 9613—1999 船用低压开关装置和电控装置 型
号编制方法

JB/T 9614—1999 LW95系列船用万能转换开关

JB 2289—1978 HZ910船用组合开关

JB 2290—1978 CJ914船用交流接触器

JB 3088—1982 船用万能转换开关技术条件

JB 2290—1978 CJ914船用交流接触器

JB 3088—1982 船用万能转换开关技术条件

JB 3089—1982 双金属片式船用热继电器技术条件

JB/DQ 4093—1983 船用交流电磁起动器

JB/DQ 4131—1985 船用电子时间继电器

JB/DQ 4132—1985 船用电子时间间隔继电器

与船用电器相关的主要标准有:

GB 2421—1981 电工电子产品基本环境试验规程
总则

GB 2423.1—1981 电工电子产品基本环境试验规程
试验A:低温试验方法

GB 2423.2—1981 电工电子产品基本环境试验规程
试验B:高温试验方法

GB 2423.4—1981 电工电子产品基本环境试验规程
试验Db:交变温热试验方法

GB 2423.7 电工电子产品基本环境试验规程 试验
Ec:倾跌与翻倒试验方法

GB 2423.16—1981 电工电子产品基本环境试验规程
试验J:长霉试验方法

GB 2423.17—1981 电工电子产品基本环境试验规程
试验Ka:盐雾试验方法

GB 3097—1983 工业无线电干扰基本测量方法

GB 4207—1984 固体绝缘材料在潮湿条件下相比漏电
起痕指数和耐漏漏电起痕指数的测定方法

GB 4859—1984 电气设备和抗干扰特性基本测量方法

GB 4988—1985 船舶和海上石油平台用电工产品的额
定频率 额定电压 额定电流

GB 7094—1986 船用电气设备振动(正弦)试验方法

JB 4159—1985 热带电工产品通用技术要求

JB 834—1985 热带垫低压电器技术要求

1.7 舰用低压电器主要标准

GJB 5A—1995 舰用低压电器通用规范

GJB 354A—1997 舰用直流(大电流)空气断路器
规范

GJB 370A—1997 舰用框架式低压断路器通用规范

GJB 1203A—2002 舰用交直流电动机控制器和开关装
置通用规范

GJB 1204A—2002 舰用交流岸电控制器规范

GJB 1320.1—1320.4—1991 舰船用交流电动机启动器

GJB 1489—1992 舰船电力设备熔断器通用规范

GJB 1779—1993 军用小型非密封式断路器通用规范

GJB 1715—1994 舰船用交流接触器通用规范

GJB 2820—1997 舰用温控继电器通用规范

GJB 5247—2003 舰用万能式转换开关通用规范

GJB 5322—2004 舰用电动转换开关

GJB 5329—2004 舰船用塑料外壳式断路器通用规范

与舰用低压电器相关的主要标准有:

GJB 747—1989 舰船电气设备外壳的定义和基本要求

GJB 13A—1997 舰船电气规范

GJB 150.1—1986 军用设备环境试验方法 总则

GJB 150.3—1986 军用设备环境试验方法 高温试验

GJB 150.4—1986 军用设备环境试验方法 低温试验

GJB 150.8—1986 军用设备环境试验方法 淋雨试验

GJB 150.9—1986 军用设备环境试验方法 湿热试验

GJB 150.10—1986 军用设备环境试验方法 霉菌试验

- GJB 150.11—1986 军用设备环境试验方法 盐雾试验
- GJB 150.14—1986 军用设备环境试验方法 浸渍试验
- GJB 150.17—1986 军用设备环境试验方法 噪声试验
- GJB 150.18—1986 军用设备环境试验方法 冲击试验
- GJB 151—1986 军用设备和分系统电磁发射和敏感度

要求

GJB 152—1986 军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量

- GJB 179A—1996 计数抽样检查程序表
- GJB/Z 299A—1991 电子设备可靠性预计手册
- GJB 450—1998 装备研制与生产的可靠性通用大纲
- ZJBK 30008—1988 军用低压电器产品型号编制方法
- GJB 4000—2000 舰船通用规范

2 刀开关和刀形转换开关

刀开关主要用来在负载切除以后，将线路与电源隔开，以保证检修人员的安全。其主要品种有熔断器式刀开关、大电流刀开关、组合开关和负荷开关等。

刀开关有的带灭弧装置，一般可带负荷接通、分断额定电流，不带灭弧装置的刀开关仅作隔离作用，不应作负荷开关来分断电流。作隔离使用时在操作上要注意操作程序。接通电路时，应先把刀开关合闸，再把负荷开关合闸；分断电路时，操作顺序正好相反，必须首先分断负荷开关，再分断 D 开关。

转换开关主要作为两种及两种以上的电源或负载的转换

和通断电路之用，其主要品种有刀形转换开关、组合（转换）开关、电动转换开关等。

2.1 HZ910 系列船用组合开关

2.1.1 用途

该系列船用组合开关供船舶上，在交流 50Hz、380V 及以下，直流 220V 及以下电气线路中，作手动不频繁地接通、分断和换接电路用。一般不能直接起动电动机和切断短路电流，仅 10A、25A 等开关可控制小容量电动机。



2.1.2 结构

该系列开关是由若干个动触头及静触头（刀片）分别装于数层绝缘件内，动触头装在附有手柄的转轴上，随转轴旋转而变更其通断位置。开关的操作机构由滑板、凸轮、扭簧及手柄等组成，采用扭簧储能使开关快速闭合和分断。

本系列开关的安装型式分板前接线式（开关通过紧固板固定在屏板前面）、板后接线式（开关固定在屏板后面）。

2.1.3 相关数据

HZ910 系列组合开关技术数据见表 2.2-7，外形及安装尺寸见表 2.2-8。

表 2.2-7 HZ910 系列组合开关技术数据

电流种类	使用类别	额定工作 电流 (A)	接 通			分 断			操作循环次数	
			试验电流 (A)	试验电压 (V)	功率因数/ 时间常数	试验电流 (A)	试验电压 (V)	功率因数/ 时间常数	有载	无功
交流	AC-22A	6 ^① 、10	I_e	U_e	0.8 ± 0.05	I_e	U_e	0.8 ± 0.05	10 000	10 000
		15 ^① 、25							5000	5000
		40 ^① 、63								
		60 ^① 、100								
	AC-3	3 ^②	$6I_e$	U_e	0.65 ± 0.05	I_e	$0.17 U_e$	0.65 ± 0.05	5000	5000
		6.3 ^②							5000	5000
直流	DC-21A	6 ^① 、10	I_e	U_e	$1 \pm 15\%$	I_e	U_e	$1 \pm 15\%$	10 000	10 000
		15 ^① 、25							5000	5000
		40 ^① 、63								
		60 ^① 、100								

① 单极开关在交流 380V、直流 220V 时的额定工作电流。

② 10A、25A 开关控制电动机时工作电流，交流分别为 3、6.3A。

表 2.2-8 HZ910 系列组合开关外形及安装尺寸

型号	极数	层数	外形尺寸 (mm)			安装尺寸		接线方法	质量 (kg)		备 注
			长	宽	高	板前接线式	板后接线式		板前接线式	板后接线式	
HZ910-10/1	1	1	65 86 ^①	58	74	55 ± 0.5 $2 \times 5^{+0.75}_0$	74 ± 1.5 $2 \times 5^{+0.75}_0$	✓	0.085	0.095	“P” 表示二位转换，有一位断路
HZ910-10/2	2	2							0.110	0.120	
HZ910-10/3	3	3							0.115	0.125	
HZ910-10P/1	1	1							0.090	0.100	
HZ910-10/2	2	2							0.108	0.118	
HZ910-10P/3	3	3							0.125	0.135	
HZ910-03	3	3									测量三相电压的电压表用
HZ910-04	4	4									测量三相四线电压的电压表用
HZ910-10R2		1									换接两电阻单接、串联或并联、单接用
HZ910-10R3		2									换接两电阻并联单接及串联用
HZ910-10R4		3									换接三电阻、单接双并、三并用
HZ910-10N/3	3	3									控制电动机正反转用 (操作机构有限位)

续表

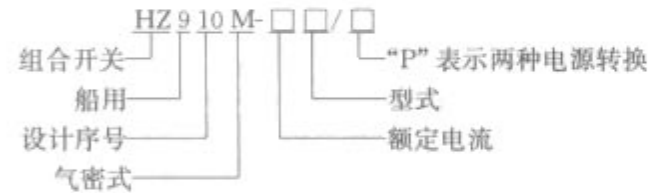
型号	极数	层数	外形尺寸 (mm)			安装尺寸		接线方法	质量 (kg)		备 注
			长	宽	高	板前接线式	板后接线式	板前或板后	板前接线式	板后接线式	
HZ910-25/1	1	1	100 114 ^①	92	108	90±0.5 2×6 ^{+0.75 0}	100±1.75 2×6 ^{+0.75 0}	✓	0.270	0.290	—
HZ910-25/2	2	2							0.325	0.345	
HZ910-25/3	3	3							0.380	0.400	
HZ910-25P/1	1	1							0.280	0.300	
HZ910-25P/2	2	2							0.347	0.367	
HZ910-25P/3	3	3							0.415	0.435	
HZ910-25R2		1									换接两电阻单接、串联或并联、 单接用
HZ910-25R3		2									换接两电阻并联单接及串联用
HZ910-25N/3	3	3									控制电动机正反转用 (操作机构有限位)
HZ910-25X/3	3	6									星形、三角形起动用
HZ910-60/1	1	1	142 153 ^①	154	143	128±0.5 2×7 ^{+0.90 0}	139±2.0 2×7 ^{+0.90 0}	✓	0.750	0.800	—
HZ910-60/2	2	2							0.950	1.000	
HZ910-60/3	3	3							1.115	1.200	
HZ910-60P/1	1	1							0.820	0.870	“P” 表示二位转换，有一位断路
HZ910-60P/2	2	2							1.040	1.090	
HZ910-60P/3	3	3							1.260	1.310	
HZ910-60R/3		2									换接两电阻并联单接及串联用
HZ910-60N/3	3	3									控制电动机正反转用 (操作机构有限位)
HZ910-60X/3	3	6									星形、三角形起动用
HZ910-100/1	1		142 153 ^①	170	151	128±0.5 2×7 ^{+0.90 0}	139±2.0 2×7 ^{+0.90 0}		0.850	0.900	—
HZ910-100/2	2	2							1.070	1.120	
HZ910-100/3	3	3							1.300	1.350	
HZ910-100P/1	1	2							0.920	0.970	“P” 表示二位转换，有二位断路
HZ910-100P/2	2	2							1.200	1.250	
HZ910-100P/3	3	3							1.480	1.530	

① 指板后接线式外形尺寸

2.2 HZ910M 系列气密式组合开关

2.2.1 用途

该系列气密式组合开关适用于交流 50Hz、380V 及以下，直流 220V 及以下船舶电气设备中，供手动不频繁地接通、分断电路和转换电路之用，一般不能直接起动电动机或切断短路电流，仅 10A、25A 等开关可控制小容量电动机。



2.2.2 结构

该系列开关是将 HZ910 系列的板前接线式组合开关装入具有气密的外壳内。壳、轴、盖密封螺帽之间的吻合处均有橡皮或石棉填料封闭、仅手柄及轴通过盖露在外面，以供操作。电缆线经过封严的电缆孔引入壳内，使开关完全与外界隔绝，外壳底部有固定的铜接头供接地。

2.2.3 相关数据

HZ910M 系列气密式组合开关技术数据见表 2.2-7，外

形及安装尺寸见表 2.2-9。

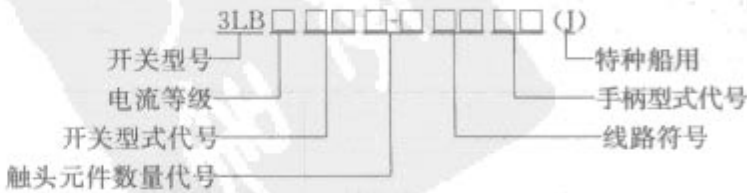
2.3 3LB (J) 系列组合开关

该开关是引进德国西门子公司产品，符合 VDE0660 和 IEC60947 标准中对低压电器的规定，同时还符合 GB/T 2423.4—1993、GB/T 2423.16—1990、GB/T 2423.17—1993 和 GB/T 3783—1994 有关条款的规定。

2.3.1 用途

该系列开关主要用于特种船舶上三相异步电动机起动和控制，以及作为主电路和辅助电路的转换之用。

型号含义如下：



2.3.2 相关数据

型式代号见表 2.2-10，手柄颜色见表 2.2-11，技术数据见表 2.2-12。

表 2.2-9 HZ910M 系列气密式组合开关外形及安装尺寸

型 号	极数	外形尺寸 (mm)			安装尺寸 (mm)	通孔直径及电缆密封 螺母的螺纹	质量 (kg)
		长	宽	高			
HZ910M-10/1	1	124	102	88.5	60×80 4×φ7	2×φ16 M24×1.5	0.275
HZ910M-10/2	2						0.287
HZ910M-10/3	3						0.300
HZ910M-10P/1	1	148	102	88.5	60×80 4×φ7	4×φ16 M24×1.5	0.315
HZ910M-10P/2	2						0.331
HZ910M-10P/3	3						0.345
HZ910M-25/1	1	169	142	128	100×100 4×φ7	2×φ20 M30×1.5	0.683
HZ910M-25/2	2						0.756
HZ910M-25/3	3						0.788
HZ910M-25P/2	2	195	142	128	100×100 4×φ7	4×φ20 M30×1.5	0.871
HZ910M-25P/3	3						0.936
HZ910M-63/1	1	224	192	163	130×130 4×φ9	2×φ32 M42×1.5	—
HZ910M-63/2	2						1.830
HZ910M-63/3	3						2.020
HZ910M-63P/2	2	256	192	163	130×130 4×φ9	4×φ32 M42×1.5	2.060
HZ910M-63P/3	3						2.270
HZ910M-100/1	1	224	192	178	130×130 4×φ9	2×φ32 M42×1.5	—
HZ910M-100/2	2						1.880
HZ910M-100/3	3						2.100
HZ910M-100P/2	2	256	192	178	130×130 4×φ9	4×φ32 M42×1.5	2.210
HZ910M-100P/3	3						2.280

表 2.2-10 3LB (J) 系列组合开关型式代号

代 号	开关型式	代 号	开关型式	代 号	开关型式
00 型	无面门联锁板	23 型	方形面板	70 型	铸铝防护外壳
17 型	带有离合器	20 型		ZD 型	自复位
18 型	普通型	60 型	塑料防护外壳		

表 2.2-11 3LB (J) 系列组合开关手柄颜色代号

手柄名称	普通手柄		长型手柄		圆型手柄		主信令手柄		无手柄
手柄颜色	黑	红	黑	红	黑	红	黑	红	
手柄代号	01	02	03	04	51	52	01	02	00

表 2.2-12 3LB (J) 系列组合开关技术数据

技 术 要 求		电 压 (V)	单 位	型 号		
				3LB3	3LB4	3LB5
额定绝缘电压			V	660		
机械寿命			次	3×10 ⁶	1×10 ⁶	1×10 ⁶
电气寿命 AC3/AC23			次	1×10 ⁶	5×10 ⁴	5×10 ⁴
操作频率			次/h	500	100	100
1. 用作负荷开关、主开关交流 50Hz、 使用类别：AC1/AC21	额定功率 P	220	kW	9	11.5	19
		380	kW	15.5	20	31.5
		500	kW	20	26	43
		660	kW	27	35	47
	额定工作电流 I ₀	380	A	25	40	63

续表

技 术 要 求		电 压 (V)	单 位	型 号		
				3LB3	3LB4	3LB5
2. 用作三相交流 50Hz 电动机开关使用类别: AC3/AC23	额定功率 P	220	kW	4.5	11	18.5
		380	kW	8	15	22
		500	kW	11	15	22
		660	kW	11	12	13
	额定工作电流 I_0	380	A	16.5	30	45
3. Y-△ 转换开关、使用类别: AC1/AC21	额定功率 P	220	kW	5.5	11	18.5
		380	kW	11	15	22
		500	kW	15	18.5	22
		660	kW	11	12	13
	额定工作电流 I_0	380	A	25	35	45
4. 单相交流 50Hz 负荷开关使用类别: AC1/AC21	额定功率 P	220	kW	5.2	8.5	13
		380	kW	9	15	22
	额定工作电流 I_0	380	A	25	40	63
5. 交流 50Hz 负荷开关使用类别: AC1/AC21	额定工作电流 I_0	220	A	25	32	
		380	A	10	14	
		500	A	4	6	
	在 $(10I_m \times 1.1U_n)$ 下额定通断能力	220	VA	60 000	7700	
		380	VA	42 000	58 000	
		500	VA	22 000	33 000	
6. 直流使用类别 DC11	额定工作电流 I_0	24	A	15	15	
		60	A	4.5	4.5	
		110	A	1.95	1.95	
		220	A	0.6	0.6	
		440	A	0.3	0.3	
		600	A	0.21	0.21	
	在 $(1.1I_0 \times 1.1U_0)$ 下额定通断能力	24	W	475	475	
		60	W	325	325	
		110	W	260	260	
		220	W	160	160	
		440	W	160	160	
		600	W	152	152	

2.4 HC300/24 隔离开关

2.4.1 用途

该系列开关在起动装置线路中用作隔离起动电机与起动设备的分断开关和用于隔离蓄电池组。

2.4.2 结构

外壳材料: 铸铝。

工作方式: 短时。

防护等级: IP56。

2.4.3 相关数据

额定电压: 24V。

额定电流: 300A。

质 量: 2.3kg。

外形尺寸: 146mm×86mm×96mm。

2.5 HC91 型系列船用电磁转换开关

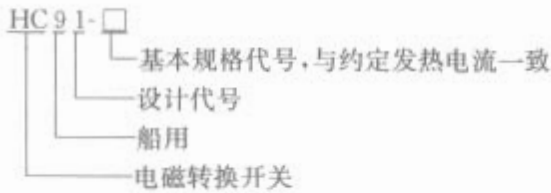
2.5.1 用途

该系列转换开关, 适用于交流 50Hz 或 60Hz, 电压至 440V 的船舶电力系统中, 用电动或手动方式接通、分断和转换电路(电源或负载)并与适当的控制和保护电路配合组成各种用途的控制和保护装置。

2.5.2 结构

该系列电磁转换开关的主触头安装在一块绝缘底板上, 同时安装在绝缘底板上的还有控制触头和磁系统, 动触头支架固定在一块可以转动的绝缘板上, 这块绝缘板由安装在一侧的电磁系统驱动, 二只独立线圈分别由控制触头控制, 线圈只在转换动作的瞬间短时通电。动静触头之间和接通依靠弹簧产生的机械力保持压力, 无需消耗能源。

型号含义:



HC91 系列船用电磁转换开关主要技术参数见表 2.2-13。

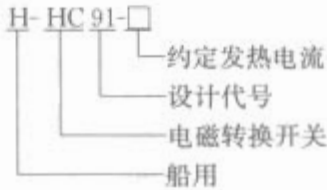
表 2.2-13 HC91 系列船用电磁转换开关主要技术参数

型 号		HC91-100	HC91-200	HC91-400	HC91-630
额定工作电流 (A) 380V		100	200	400	630
额定绝缘电压 (V)		500			
额定工作电压		440V/60Hz、380V/50Hz、220V/50Hz			
寿命	机械	6000		5000	
	电气	2000		2000	
极数		2/3/4			
额定控制电压		AC220V/50Hz、AC380V/50Hz			
质量 (kg)		17		21	23
外形尺寸 (mm×mm×mm)		400×200× 275 (2、3 极) 460×200× 275 (4 极)		442×240× 275 (2、3 极) 516×240× 275 (4 极)	
喷弧距离		50		50	

2.6 H-HC91 系列舰用电磁转换开关

该系列转换开关是在船用 HC91 系列产品的基础上派生的，其能满足舰船的特殊要求，具有耐冲击、振动等方面性能。在舰船电力系统中，电磁转换开关用作重要设备的电源或负载转移。

型号含义：



H-HC91 系列舰用电磁转换开关主要技术参数见表 2.2-14。

表 2.2-14 H-HC91 系列舰用电磁转换开关主要技术参数

型 号	H-HC91-100	H-HC91-200	H-HC91-400	H-HC91-630	H-HC91-1000
额定工作电流 (A) 380V (约定发热电流)	100	200	400	630	1000
额定绝缘电压 (V)	500				
额定工作电压	400V/60Hz、380V/50Hz、220V/50Hz				
寿命	机械	6000	5000	3000	
	电气	2000	2000	1500	
额定控制电压	AC220V/50Hz、AC380V/50Hz				AC380V/50Hz
质量 (kg)	17	21	23	41	
外形尺寸 (mm×mm×mm)	400×220×275 (2、3 极)		442×240×275 (2、3 极)		635×240×275 (3 极)
喷弧距离	50	50	100		

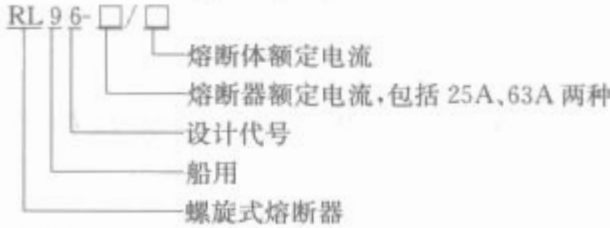
3 熔断器

3.1 RL96 船用螺旋式熔断器

3.1.1 用途

RL96 船用螺旋式熔断器适用于交流额定电压 500V 及以下，额定电流至 63A 的船舶电路中，作短路和过载保护之用。

熔断器的型号及其含义如下：



3.1.2 结构

该熔断器为螺旋式，由瓷帽、熔断体及底座三部分组成，其绝缘件均由电瓷制成，熔断体内装有一组熔片并充填石英砂，熔断体端面具有明显的熔断指示器，当熔断器动作时，指示器跳出，通过载熔件上的观察孔可见。熔断器全部金属零件均有可靠的防蚀层。

3.1.3 相关数据

技术参数见表 2.2-15，熔断特性见表 2.2-16，外形和安装尺寸见表 2.2-17。RL96 系列熔断器外形见图 2.2-1。

表 2.2-15 RL96 船用熔断器基本参数

额定电压 (V)	熔断器额定电流 (A)	熔断体额定电流 (A)	额定分断能力	
			kA	cosφ
500	25	2、4、6、10、16、25	50	0.1~0.2
	63	35、50、63		

表 2.2-16 RL96 船用熔断器特性

熔断体额定电流 (I_n) (A)	约定不熔断电流 (A)	约定熔断电流 (A)
$I_n \leq 4$	$1.5 I_n$	$2.1 I_n$
$4 < I_n < 16$	$1.5 I_n$	$1.9 I_n$
$16 \leq I_n \leq 63$	$1.25 I_n$	$1.6 I_n$

表 2.2-17 RL96 船用熔断器外形和安装尺寸

熔断器额定电流 (A)	安 装 尺 寸								质量 (kg)
	A	B	C	D	E	F	G	M	
25	43	81	62	27.5	30	6	4.5	5	0.181
63	54	82	84	37.5	32.5	6	5	6	0.325

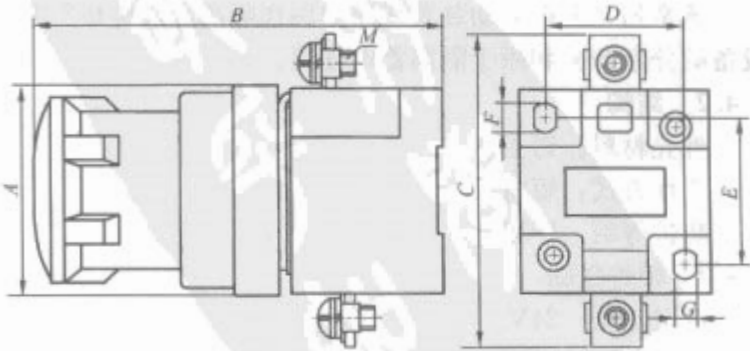


图 2.2-1 RL96 系列熔断器外形

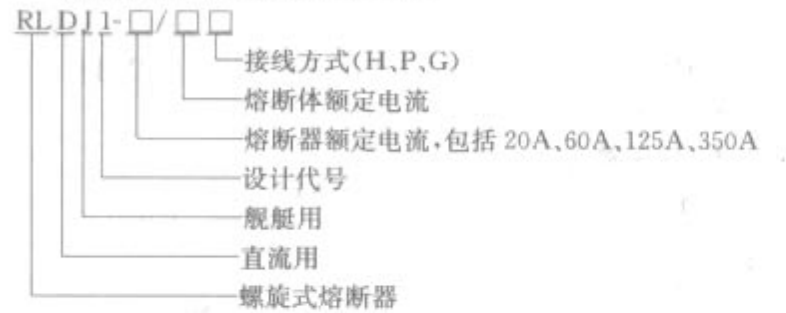
3.2 RLDJ1 型艇用直流螺旋式熔断器

3.2.1 用途

RLDJ1 型艇用直流螺旋式熔断器适用于直流电压至

640V，直流额定电流 350A 及以上的舰艇电力系统中，作短路和过载保护之用。

熔断器的型号及其含义如下：



3.2.2 结构

该熔断器为螺旋式，由瓷帽、熔断体及底座三部分组成，其绝缘件均由电瓷制成，熔断体内装有一组熔片并充填石英砂，熔断体端面具有明显的熔断指示器，当熔断器动作时，指示器跳出，通过载熔件上的观察孔可见。

3.2.3 相关数据

技术参数见表 2.2-18，熔断特性见表 2.2-19，分断能力见表 2.2-20。

表 2.2-18 RLDJ1 型熔断器基本参数

额定电压 (V)	熔断器支持件 额定电流 (A)	熔断体额定电流 (A)	分断能力	
			kA	初始电流 上升率 (A/s)
640	20	6、10、15、20	11	3 250 000
	60	25、35、60		
	125	80、100、125		
	350	160、200、225、 260、300、350		

表 2.2-19 RLDJ1 型熔断器熔断特性

熔断体额定电流 I_n (A)	135% I_n 时熔断时间	200% I_n 时熔断时间
	min	s
$5 < I_n \leq 20$	6~60	8~120
$20 < I_n \leq 30$		10~240
$30 < I_n \leq 60$		
$60 < I_n \leq 100$	12~120	20~360
$100 < I_n \leq 200$		30~480
$200 < I_n \leq 400$		40~600

表 2.2-20 RLDJ1 型熔断器分断能力

序 号	1	2	3	4	5
恢复电压 (V)	$640_{-10\%}^{+9\%}$				
预期试验电流 (A)	$I_1 = 11\ 000$	I_2	$I_3 = 4.3 I_n$	$I_4 = 2.7 I_n$	$I_5 = 1.7 I_n$
电流允差	+10% 0	—	±20%	±20%	+20% 0
初始电流上升率 或时间常数	$3.25 \times 10^6 \times (1 \pm 10\%) \text{ A/s}$ $3.4 \times (1 \pm 10\%) \text{ ms}$				

RLDJ1-20、60 型熔断器的外形和接线方式如图 2.2-2 所示。

RLDJ1-125、350 型熔断器的外形和接线方式如图 2.2-3 所示。

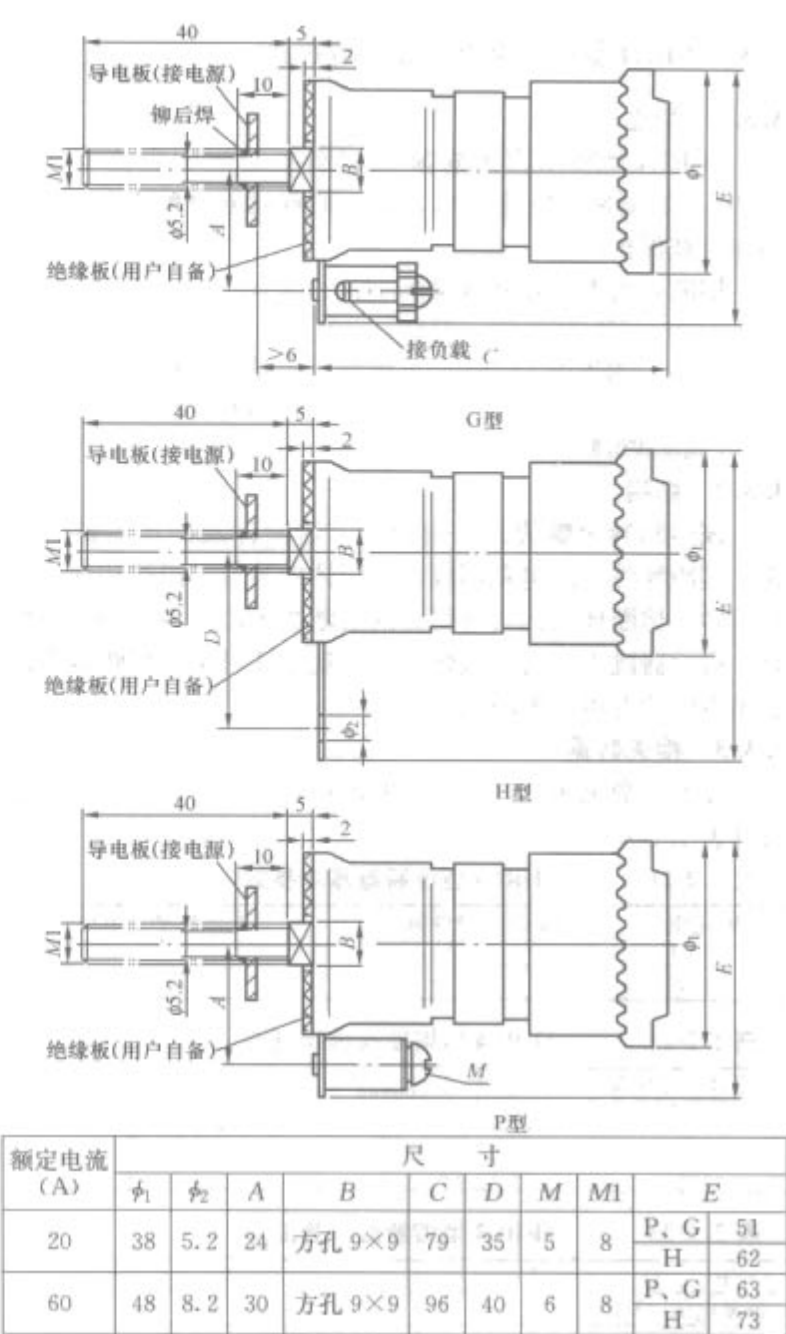


图 2.2-2 RLDJ1-20、60 型熔断器的外形和接线方式

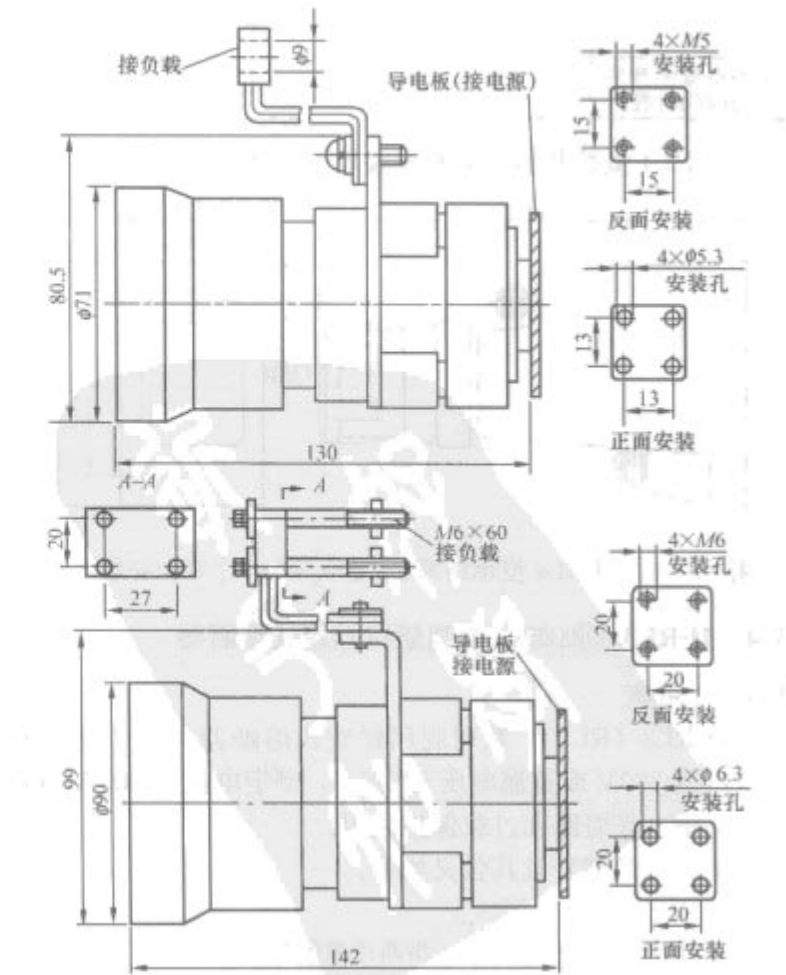


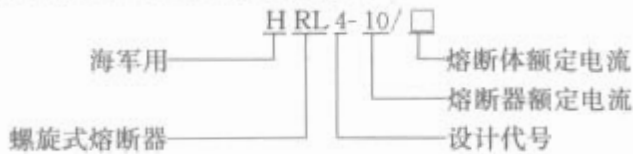
图 2.2-3 RLDJ1-125、350 型熔断器的外形和接线方式

3.3 H-RL4 型舰用直流螺旋式熔断器

3.3.1 用途

H-RL4 型舰用直流螺旋式熔断器适用于直流电压至 1000V, 直流额定电流 10A 及以下的舰艇电力系统中, 作短路和过载保护之用。

熔断器的型号及其含义如下:



3.3.2 结构

该熔断器为螺旋式, 由瓷帽、熔断体及底座三部分组成, 其绝缘件均由电瓷制成, 熔断体内装有一组熔片并充填石英砂, 熔断体端面具有明显的熔断指示器, 当熔断器分断时, 指示器跳出, 通过载熔件上的观察孔可见。熔断器全部金属零件均有可靠的防蚀层。

3.3.3 相关数据

技术参数见表 2.2-21, 熔断器特性见表 2.2-22, 分断能力见表 2.2-23。

表 2.2-21 H-RL4 型熔断器基本参数

额定电压 (V)	熔断器支持件额定电流 (A)	熔断体额定电流 (A)
1000	10	6、10

表 2.2-22 H-RL4 型熔断器熔断特性

熔断体额定电流 I_n (A)	135% I_n 熔断时间	200% I_n 熔断时间
6	360~3600s 内	120s 内
10	360~3600s 内	120s 内

表 2.2-23 H-RL4 型熔断器分断能力

序 号	1	2	3	4	5
恢复电压 (V)	1000 ⁰ _{-10%}				
预期试验电流 (A)	$I_1=5000$	I_2	$I_3=4.3I_n$	$I_4=2.7I_n$	$I_5=1.7I_n$
电流允差	+10% ₀	—	±20%	±20%	+20% ₀
初始电流上升率或时间常数	$3.25 \times 10^6 \times (1 \pm 10\%) \text{ A/s}$				

H-RL4 型熔断器外形和安装尺寸如图 2.2-4 所示。

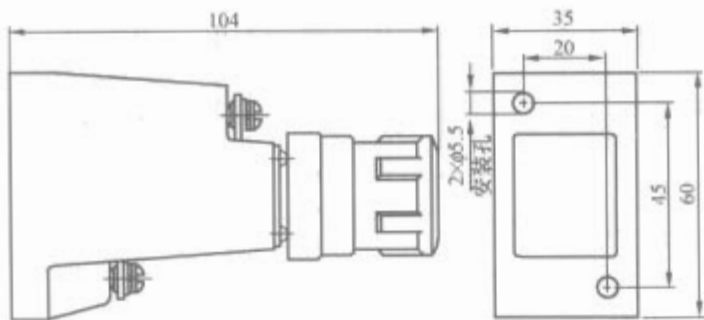


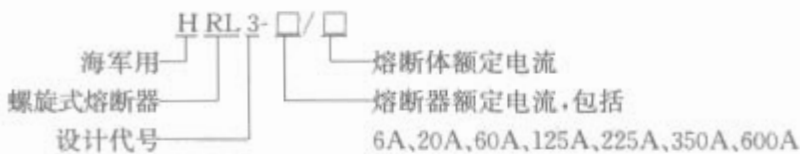
图 2.2-4 H-RL4 型熔断器(质量 0.33kg)外形和安装尺寸

3.4 H-RL3 (RL93) 系列舰用螺旋式熔断器

3.4.1 用途

H-RL3 (RL93) 系列舰用螺旋式熔断器适用于交流额定电压至 380V 或直流电压至 320V, 额定电流至 600A 的船舶电路中, 作短路和过载保护之用。

熔断器的型号及其含义如下:



3.4.2 结构

该熔断器主要由瓷帽、熔断体及底座三部分组成。其主要部分均由电瓷组成。熔断体内有一组熔体(丝、片)并充填石英砂, 熔断体上具有明显的熔断指示, 当电路分断时, 指示粒跳出, 通过瓷帽上的观察孔可见。能承受船用电器器的冲击和振动要求。

3.4.3 相关数据

技术参数见表 2.2-24, 熔断器特性见表 2.2-25。

表 2.2-24 H-RL3 型熔断器基本参数

额定电压 (V)	熔断器额定电流 (A)	熔断体额定电流 (A)	分断能力	
			~380V ($\cos\varphi=0.35$)	~320V (稳定值) ($T=15\text{ms}\pm 2.25\text{ms}$)
~380 ~320	6	6	25 000	10 000
	20	10, 15, 20		
	60	25, 35, 60		
	125	80, 100, 125		
	225	160, 200, 225		
	350	260, 300, 350		
	600	430, 500, 600		

表 2.2-25 H-RL3 型熔断器熔断特性

熔断体额定电流 I_n (A)	约定不熔断电流 (A)	约定熔断电流 (A)	动作时间 (h)
$I_n \leq 10$	$1.5 I_n$	$2.1 I_n$	1
$10 < I_n \leq 30$	$1.4 I_n$	$1.75 I_n$	
$30 < I_n \leq 400$	$1.3 I_n$	$1.6 I_n$	
$400 < I_n \leq 600$			2

外形和安装尺寸见图 2.2-5~图 2.2-7 和表 2.2-26~表 2.2-28。H-RL3 (RL93) -6、20、60 三种型式的接线方式

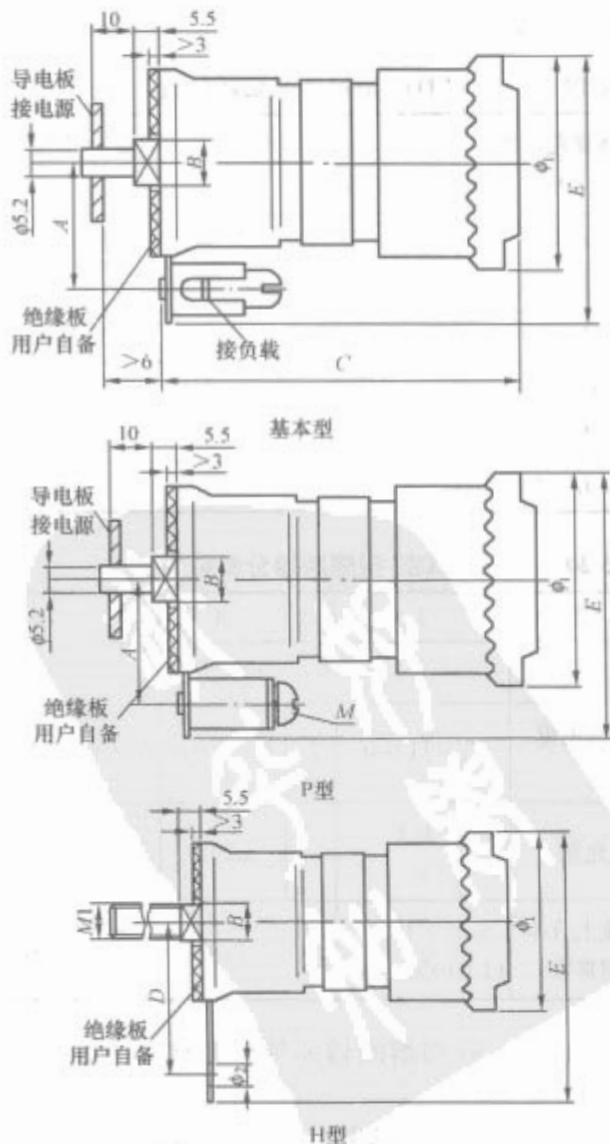


图 2.2-5 H-RL3-6、20、60 型熔断器外形

表 2.2-26 HRL3 船用熔断器外形和安装尺寸

额定电流 (A)	尺 寸									质量 (kg)	
	ϕ_1	ϕ_2	A	B	C	D	M	M1	E		
6	30	4.2	19	方孔 6×6	60	30	4	6	基本、P	38	0.073
									H	48.5	
20	39.5	5.2	24	方孔 9×9	70	35	5	8	基本、P	47.5	0.154
									H	58	
60	45	8.2	30	方孔 9×9		40	6	8	基本、P	58.5	0.203
									H	68.5	

为基本型、P 型、H 型三种 H-RL3 (RL93) -125、225、350、600 四种型式的进线端为板后和板前接线式，出线端为板前接线式。

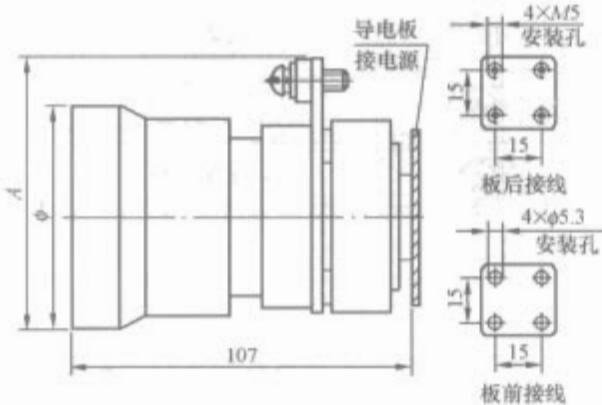


图 2.2-6 H-RL3-125 (质量 1.15kg)、225 (质量 1.62kg) 型熔断器外形

表 2.2-27 H-RL3-125、225 型船用熔断器外形和安装尺寸

额定电流 (A)	尺 寸		质 量 (kg)
	ϕ	A	
125	71	81	1.15
225	78	85	1.62

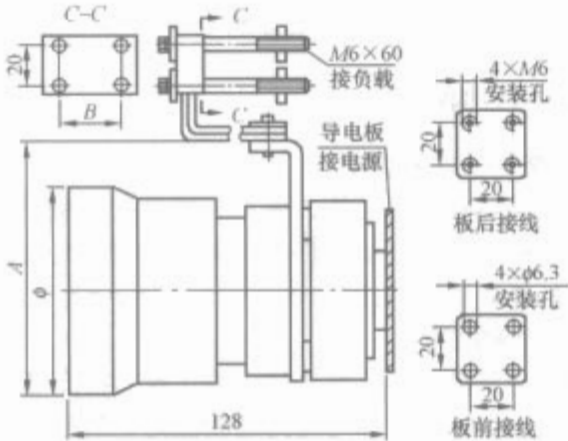


图 2.2-7 H-RL3-350、600 型熔断器外形

表 2.2-28 H-RL3-350、600 型船用熔断器的外形和安装尺寸

额定电流 (A)	尺 寸			质 量 (kg)
	ϕ	A	B	
350	90	100	27	2.83
600	110	130	33	5.061

3.5 H-STF901 系列舰用有填料封闭管式快速熔断体

3.5.1 使用范围

H-STF901 系列舰用有填料封闭管式快速熔断体，适用

于额定电压直流至 640V，额定电流至 500、1000、2000、3000A (DC320V) 的舰船直流电力系统中，作为直流电力系统短路保护。

型号及其含义：



3.5.2 结构与组成

该系列熔断体为平板型结构，接线方式为母排联接，熔断体侧面带有熔断信号撞击装置。

熔断体由接触板、熔管、熔体、石英砂、熔断撞击器等组成，可根据需要可安装熔断信号装置。

3.5.3 相关数据

H-STF901 型熔断器技术参数见表 2.2-29。

表 2.2-29 H-STF901 型熔断器技术参数

熔断体额定电压 (V)	熔断体额定电流 (A)	分断能力	
		kA	时间常数 (ms)
640	500、1000、2000、3000	100	15~20
320	3000	100	15~20

H-STF901 型熔断器熔断体外形和安装尺寸如图 2.2-8~图 2.2-10 所示。

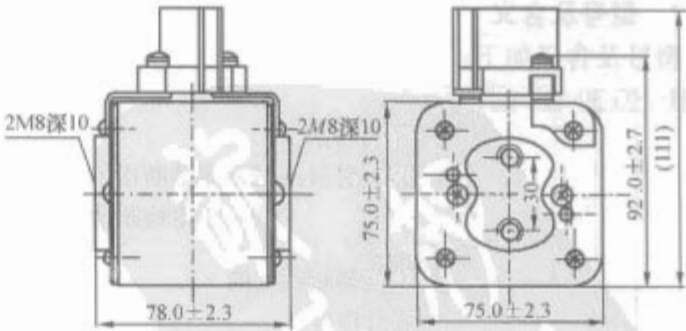


图 2.2-8 H-STF901 型熔断器 500A 熔断体外形和安装尺寸

3.6 H-HG30-32 舰用熔断器式隔离器

3.6.1 使用范围

H-HG30-32 熔断器式隔离器适用于交流 50Hz，额定绝缘电压 500V、额定工作电压 400V 及以下的配电线路中，作为舰船用低压电器配电系统的过载和短路保护；由于产品具有明显的断开点，可在线路末端作电源隔离。隔离器若配

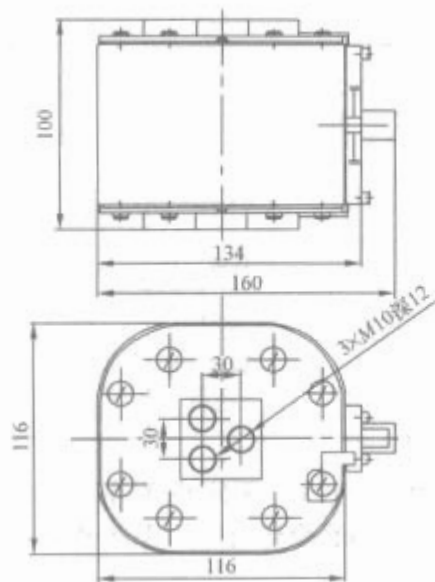


图 2.2-9 1000A、2000A、3000A 熔断体外形和安装尺寸

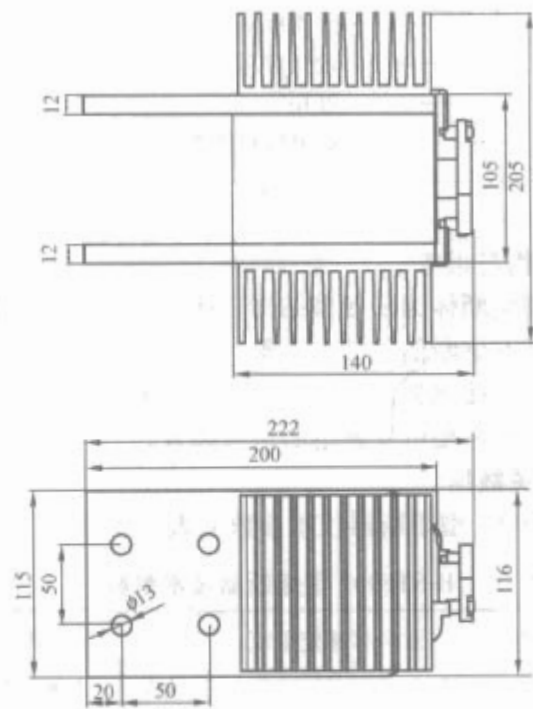
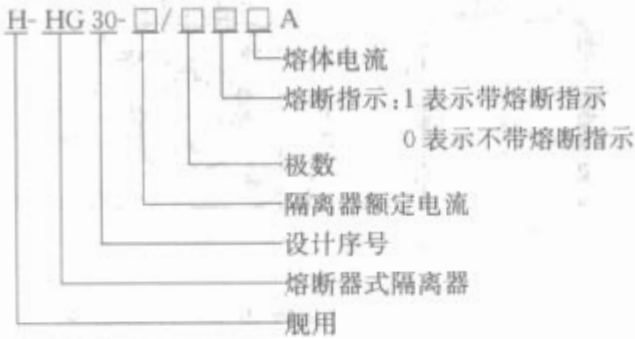


图 2.2-10 2000、3000 熔断体外形和安装尺寸 (带散热器)

用 RT14 型圆筒形帽熔断体, 可分断 100kA 的预期短路故障电流。

3.6.2 型号及含义

型号及含义如下:



3.6.3 结构和组成

隔离器由熔断体、熔断体支持件和熔断指示等组成, 为专职人员使用的隔离器。

隔离器选用 RT14 或 RT30 圆筒形帽熔断体, 可实现一般用途全范围分断能力的短路保护和过载保护。

隔离器的安装方式有导轨安装和螺钉安装两种。当采用导轨安装方式时, 应选用 TH35-7.5 型标准导轨。

隔离器的额定参数见表 2.2-30。

表 2.2-30 熔断器式隔离器额定参数

额定绝缘电压 U_i (V)	额定工作电压 U_n (V)	隔离器额定电流 I_e (A)	熔断体额定电流 I_n (A)	额定短路分断能力	
				I_t (kA)	$\cos\varphi$
500	400/120 ^①	32	2, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32	100 ^②	0.1~0.2
			25, 32	20 ^③	0.25~0.35

- ① 带熔断指示的隔离器用于 120V 及以下电源系统中, 应选用额定工作电压为 120V 的隔离器。
② 必须采用 RT14 型圆筒形帽熔断体。
③ 采用 RT30 型圆筒形帽熔断体。

熔断器式隔离器所配的熔断体尺寸为 $\phi 10 \times 38$ 。

3.6.4 外形和安装尺寸

熔断器式隔离器外形和安装尺寸如图 2.2-11 所示。

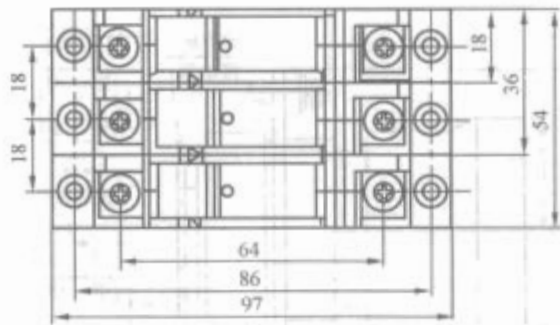


图 2.2-11 熔断器式隔离器外形和安装尺寸

4 船用低压断路器

4.1 用途和主要类型

船用低压断路器的主要用途为: 在船舶电力系统中正常情况下闭合或断开供应电能的电路, 以达到停电、供电和转换电路的目的, 它适用于不频繁的操作; 当船舶电网出现不正常情况时 (例如过载、欠电压或短路等), 能自动地把负载从电网上断开。

船用低压断路器主要分为船用框架式低压断路器和船用塑料外壳式低压断路器两类。

4.2 设计和结构特点

4.2.1 断路器的性能要求

船用断路器在电气性能方面与一般工业用断路器基本一致, 但对机械和气候环境条件的适应方面有较大区别, 船用断路器的性能要求更高。

4.2.1.1 通断能力

断路器与其他电器产品相比, 最主要的特点是能接通与分断短路电流。因此, 额定短路通断能力是断路器的最重要性能。断路器的额定短路通断能力与所采用的短路性能类别有关, 短路性能类别则按断路器的额定操作顺序和完成额定短路通断能力试验程序后的状态来规定。在 GB 14048.2 中规定了两种短路性能类别, 见表 2.2-31。

表 2.2-31 断路器的短路性能类别表

短路性能类别	短路通断能力试验的额定操作程序	短路试验后的状态
P-1	O ^① -T-CO ^②	不承载额定电流应保证正常工作
P-2	O-T ^③ -CO-T-CO	

- ① O—表示分断操作。
② CO—表示在接通操作后, 紧接着一个断开操作。
③ T—表示规定的时间间隔, 通常等于 3min, 或过电流脱扣器的复位时间。

4.2.1.2 限流能力

对于快速、限流断路器,要求限流能力愈强愈好。限流能力可用限流特性曲线表示,也可用分断 I^2t 表示。前者可用双对数坐标曲线表示,纵坐标为预期电流峰值,横坐标为预期电流有效值,曲线就是相应的实际分断电流。

4.2.1.3 保护性能

船用断路器的保护特性包括过电流脱扣器的保护特性和欠电压保护等方面的特性。过电流脱扣器是断路器的保护特性有长延时、短延时、瞬时组成的三段保护,或其中之一组成的二段保护,甚至在某些特殊场合下仅采用一段保护。为了实现选择性断开,过电流脱扣器在短路电流范围内要求短路延时。

4.2.1.4 寿命

断路器的寿命用完成闭合、分断操作的次数表示。寿命可分为机械寿命和电气寿命两种指标。

4.2.1.5 冲击、振动

船用断路器须能承受船舶航行中产生的冲击、振动,对于舰船环境条件下,还须承受GJB 150标准中规定的强冲击而不影响断路器的正常工作。

4.2.1.6 三防性能

在海洋性气候环境条件下,船用断路器的霉菌、盐雾、湿热“三防”性能要求高于一般工业用的断路器,这对断路器加工过程中镀层的工艺要求更高,选用的材料要求也较高,在JB/T 5796《船用断路器低压空气断路器》中均作明确规定。

4.2.2 断路器的设计要点

4.2.2.1 绝缘配合

断路器可能用于不同的场所和不同的污染等级,船用断路器一般用在污染等级3的环境中。为了使断路器的工作可靠,得到最佳绝缘配合,在选择电气间隙和爬电距离时(断路器的电气间隙最小值按相应标准规定),还应考虑到绝缘材料类别。

4.2.2.2 提高可靠性

要保证断路器设计成功,应注意断路器在电气上、机械上和保护方面的可靠性。

4.2.2.3 力求上下进线通断能力相等

断路器正常的连接为上母线(上接线端子)接至电源端,下母线(下接线端子)接至负载端。但是断路器用作母联开关时,则下母线也就接到了电源端,有些支路开关,也有这样的情况。但在实际上,有许多断路器不能用下进线,它们在下进线短路通断力试验时受到极大的破坏。作用船用断路器,特别是发电机保护用断路器,经常将电源端接到断路器的下接线端子上,因此,这一点须特别注意。

4.2.2.4 积木式装配

由于断路器的保护性能日趋完善,部件也越来越多,因此,考虑元件装配方便是十分必要的。所谓积木式装配,就是把各个部件,如触头系统、灭弧室、操作机构、过电流脱扣器、欠电压脱扣器、分励脱扣器和辅助开关等,均设计成独立的部件,然后用两个或一个螺钉甚至不用螺钉就可把部件装到主体断路器上去。

4.2.2.5 检修方便

对于船用断路器,维修空间较小,应要求检修方便。设计抽屉式断路器是提高检修方便的措施之一,有的塑料外壳断路器,带插入式安装台也利于检修。

4.2.2.6 抗冲击、振动

船用断路器结构中各个可动零部件应尽量采用平衡设

计,以保证断路器的抗冲击、振动性能。零部件尽可能不要设计成悬臂梁结构,特别要减小直角悬臂梁结构,对于悬臂梁结构需要采用加强筋,以防止振动时损伤。对有可能因冲击、振动而造成断路器误动作的关键零部件还可采取设计阻尼、锁扣等多种结构来解决此问题。对于脱扣器内部线路板上电子元器件应尽量降低元器件的安装高度,并固定牢固,以防止因振动而引起的损坏。

4.2.3 断路器的结构特点

船用框架式断路器的特点是有一钢制框架(小容量的也有用塑料底板),所有部件包括触头系统、灭弧室、自由脱扣机构、电动传动(电磁铁或电动机)机构、分励脱扣器、欠电压脱扣器、过电流脱扣器、辅助开关等,都安装于框架内,导电部分需加绝缘。具有多种的变化方式,如多种的操作方式、多种的保护型式、多种的接线方式和用途,以及不同数量的辅助触头等。目前新型框架断路器总体上大多采用积木式立体布置结构,其部件大多是设计成可拆卸式的,便于安装和制造。

塑料外壳式断路器的特点是把触头系统、灭弧室、操作机构及各种脱扣器等主要部件都安装在一个塑料压制的外壳(分底壳和盖两部分)内。这种断路器大都是非选择型的,多用作配电支路负载端开关和电动机保护开关。但随着大容量和带短延时(约0.05~0.2s)的塑料外壳式断路器的出现,也有的做电源总开关,实现电网选择型保护的趋向。目前塑料外壳式断路器可分为一般型和限流型两种。

塑料外壳式断路器总体上大多采用平面布置即将触头系统、操作机构、各种脱扣器、安装支架、主轴、脱扣轴等都铺开布置在一块绝缘底板上。这种布置方式的优点是容易接触到每一个部件,便于装配和调整,也便于更换易损零件,便于维修。其缺点是安装面积较大,降低了断路器的经济指标。

4.3 断路器的选用

4.3.1 交流断路器的选用

交流断路器的一般选用原则如下:

(1) 断路器的工作电压大于或等于线路额定电压。

(2) 断路器的额定电流大于或等于线路计算负载电流。

(3) 断路器的额定短路通断能力大于或等于线路中可能出现的最大短路电流,按有效值计算。假如选用的断路器额定电流与要求相符,但额定短路通断能力小于断路器安装点的线路最大短路电流,则必须提高选用断路器的额定电流。如果这样还不能满足需要,则考虑采用级联保护或采用限流断路器。

(4) 断路器过电流脱扣器的整定电流和保护特性应与负载特性相匹配。

(5) 断路器欠电压脱扣器额定电压等于线路额定电压,是否需要加装欠电压脱扣器,应按使用要求而定,并非任何场合都需要带欠电压脱扣器。在某些供电质量较差的系统,选用带欠电压保护的断路器反而会因为电压波动而经常造成不希望的断电。在这种场合中,若必须带欠电压脱扣器则应考虑有适当的延时。

(6) 具有短延时的断路器若带欠电压脱扣器,则欠电压脱扣器必须是延时的。其延时大于或等于短路延时时间。

(7) 断路器的分励脱扣器额定电压等于控制电源电压。

(8) 电动传动机构的额定工作电压等于控制电源电压。

(9) 校核断路器的接线方向。母线联络断路器则一定要选用可从下端子进线的断路器。

4.3.2 直流断路器的选用

在选用直流断路器时，首先要考虑到应用场所的要求。如果对动作速度要求不高的场所，如电动机、发电机组和蓄电池电源的情况下可采用一般的直流断路器。在晶闸管整流器作为电源的情况下，由于这些装置的过载能力极低，则必须采用快速断路器。

快速断路器有极性问题。无极性的直流断路器可用于馈电开关、母线联络开关和正极保护开关。正向有极性断路器可用做馈电开关、正极开关、负极开关及逆变开关，逆向有极性断路器用做逆功率保护开关。

直流断路器的选用条件：

- (1) 工作电压大于直流线路的电压。考虑到反接制动和逆变条件，应大于2倍电路电压。
- (2) 额定电流大于或等于直流线路的负载电流；对于短时周期负载，可按其等效发热电流考虑。
- (3) 过电流动作整定值大于或等于电路正常工作电流最大值；对于起动直流电动机的情况，应避过电动机起动电流。
- (4) 逆流动作整定值小于被保护对象允许的逆流数值。
- (5) 额定短路通断能力大于电路中能出现的最大短路电流。对于快速断路器初始上升陡度（初始 $\frac{di}{dt}$ ）大于电路可能出现的最大短路电流的初始上升陡度。
- (6) 快速断路器的 I^2t 小于与其配合的快速熔断器 I^2t 。

4.4 断路器的维护检修

断路器是一种比较复杂的保护电器，除正确选用外，尚需妥善的维护，才能保证断路器完成预定的工作任务。应尽量做到：

- (1) 在断路器投入使用前应将各磁铁工作面（如失电压脱扣器的磁系统吸合面）的防锈油指抹净，以免影响磁系统的动作值。
 - (2) 操作机构在使用一段时间后（可考虑1~2年一次），在传动机构部分（小容量塑壳断路器不需要）应加润滑油。
 - (3) 每隔一段时间（例如趁定期检修时），应清除落于断路器上的灰尘，以保证断路器良好绝缘。
 - (4) 灭弧室在因短路分断后，或较长时期使用之后，应清除来弧室内壁和栅片上的金属颗粒和黑烟。有的陶瓷灭弧室容易破损，如发现破损的灭弧室，不要使用，以免造成不应有的事故。长期未使用的灭弧室（如作为配件的灭弧室），在需使用前应先烘一次，以保证良好的绝缘。
 - (5) 断路器的触头在长期使用后，如触头表面发现有毛刺、金属颗粒等应当清理，以保证良好的接触。可更换的弧触头如发现磨损至原来厚度的1/3时才考虑更换。
 - (6) 定期检查各脱扣器的电流整定值和延时，特别是电子式脱扣器，应定期用试验按钮检查其动作情况。
- 低压断路器常见故障见表2.2-32。

表 2.2-32 断路器常见故障一览表

故障现象	原 因	处 理 办 法
手动操作断路器不能闭合	1. 失电压脱扣器无电压或线圈损坏 2. 储能弹簧变形，导致闭合合力减小 3. 反作用弹簧力过大 4. 机构不能复位再扣	1. 检查线路，施加电压或更换线圈 2. 更换储能弹簧 3. 重新调整弹簧力 4. 调整再扣面至规定值
电动操作断路器不能闭合	1. 操作电源电压不符 2. 电源容量不够 3. 电磁铁拉杆行程不够 4. 电动机操作定位开关变位 5. 控制器中整流或电容器损坏	1. 调换电源 2. 增大操作电源容量 3. 重新调整或更换拉杆 4. 重新调整 5. 更换损坏元件
有一相触头不能闭合	1. 一般型断路器的一相连杆断裂 2. 限流断路器拆开机机构的可折连杆之间的角度变大	1. 更换线圈 2. 调整至原技术条件规定值
分励脱扣器不能使断路器立即分断	1. 线圈短路 2. 电源电压太低 3. 再扣接触面太大 4. 螺栓松动	1. 更换线圈 2. 调换电源电压 3. 重新调整 4. 拧紧
欠电压脱扣器不能使断路器分断	1. 反力弹簧变小 2. 如保储能释放，则储能弹簧变小或断裂 3. 机构卡死	1. 调整弹簧 2. 调整或更换储能弹簧 3. 消除卡死原因，如生锈
起动电动机时断路器立即分断	过电流脱扣器长瞬时整定值太小或选用不对	调整瞬时整定值
断路器闭合后经一定时间自行分断	1. 过电流脱扣器长延时整定值不对 2. 热元件或半导体延时电路元件变化	1. 重新调整 2. 更换
欠电压脱扣器噪声	1. 反力弹簧太大 2. 铁心工作面有油污	1. 重新调整 2. 清除油污

续表

故障现象	原 因	处 理 办 法
断路器温升过高	1. 触头压力过低 2. 触头表面过分磨损或接触不良 3. 两个导电零件连接螺钉松动 4. 触头表面污染	1. 调整触头压力或更换弹簧 2. 更换触头或清理接触面, 不能更换者, 只好更换整台断路器 3. 拧紧螺钉 4. 清除油污或氧化层
辅助开关不通	1. 辅助开关的动触桥卡死或脱落 2. 辅助开关传动杆断裂或滚轮脱落 3. 触头不接触或氧化	1. 拨正或重新装好触桥 2. 更换传动杆或辅助开关 3. 调整触头, 清理氧化膜
带电子式脱扣器的断路器的误动作	1. 电子式脱扣器元件损坏 2. 电子式外界电磁干扰	1. 更换损坏元件 2. 清除外界干扰, 例如邻近的大型电磁铁的操作、接触器的分断、电焊等, 予以隔离或更换线路

4.5 船用断路器典型技术数据

4.5.1 船用框架断路器

4.5.1.1 ZDW 系列直流空气断路器

(1) 主要用途。该型空气断路器的触头系统采用两挡旋转结构, 因而体积小, 质量轻, 弧触头具有补偿措施, 有稳定性很高的特点。采用电动弹簧储能合闸, 分励脱扣器断开, 可实现遥控控制, 灭弧室为迷宫式由陶瓷制成, 自由脱扣结构和保护装置均采用特殊防冲措施, 保证产品在 1 级冲振条件下可靠工作。

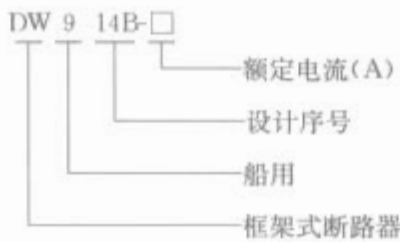
ZDW1-11/12 手动操作, 分励脱扣器或手动断开。

(2) 直流断路器主要技术数据见表 2.2-33。

4.5.1.2 DW914 (AH) 系列船用框架式空气断路器

(1) 主要用途: DW914B 系列引进日本寺崎株式会社的“AH”产品改进型, 该产品适用于交流 50~60Hz、电压 660V 及以下, 直流 440V 及以下的船用配电线路中做过载、欠电压及短路保护用, 以及在正常工作条件下供该线路频繁转换使用。

(2) 型号含义:



(3) 环境条件如下:

- 环境空气温度: +45℃ -5℃
- 空气相对湿度: <95% (20℃±5℃)
- 凝露: 有
- 盐雾: 有
- 霉菌: 有
- 油气: 有
- 倾斜度: 22.5°
- 振动: 有

(4) 结构与特性: DW914B 系列产品具有多种保护装置、保护性能完善及通断能高等特点。合闸方式有电磁合闸、电动机储能合闸和手动储能合闸三种形式, 产品并且有体积小, 通断能力指标高; 可做成抽出座式。

(5) DW914 系列断路器的主要技术参数见表 2.2-34。

4.5.1.3 CW1 系列框架式断路器

(1) 概述。CW1 系列智能型万能式断路器用于控制和保护低压配电网络, 一般安装在低压配电柜中作主开关起总保护作用。

- 1) 交流额定电流 630~5000A。
- 2) 短路分断能力 80~120kA (有效值)。
- 3) 额定工作电压 AC690V 及以下。
- 4) 具有 3 极和 4 极。
- 5) 抽屉式和固定式。
- 6) 可下进线安装。
- 7) 多种智能控制器, 提供不同功能。
- 8) 执行 IEC 60947-2、GB 14048.2 标准。

(2) 型号定义:

表 2.2-33 直流断路器主要技术数据

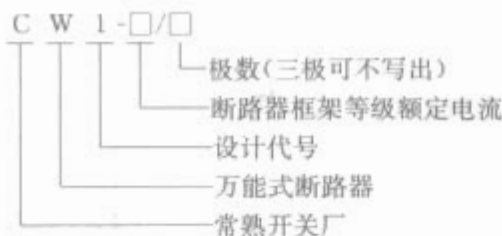
型号	极数	额定电压 (V)	额定电流 (A)	通断能力 (kA)	短路弧区 (mm)	操作力矩 (N·m)	机械寿命 (次)	操作方式	外形尺寸 长×宽×高 (mm×mm×mm)	质量 (kg)	生产厂
ZDW-12	3	320	2×1000 1×1600	20	≤160	135	5000	手动	460×354×290	52.2	湘潭电机厂三分厂
ZDW-13	3	320	2×1000 1×1600	20	≤160	135	5000	手动	460×354×290	52.2	
ZDW1-11/12	3	320	1500	30		160	5000	手动	460×354×290	52	
ZDW2-31	4	800	2500	46	≤850	225	5000	电动或手动	729×354×640	180	
ZDW2-71	2	800	2×2500	45	≤850	225	5000	电动或手动	729×354×640	180	
ZDW4-21	2	800	2000	27	≤450	5	5000	手动	396×398×738	90	

表 2.2-34 DW914 系列断路器主要技术参数

壳 架 等 级		1				2				3							
型 号		AHB-6B (DW914B-630)		AHB-10B (DW914B-1000)		AHB-16B (DW914B-1600)		AHB-20C (DW914B-2000)		AHB-25C (DW914B-2500)		AHB-30C (DW914B-3200)		AHB-40C (DW914B-4000)			
额定电流(A)		630		1000		1600		2000		2500		3200		4000			
中性极额定电流(A)		630		1000		1600		2000		2500		3200		4000			
极数		2 3 4		2 3 4		2 3 4		2 3 4		2 3 4		2 3 4		2 3 4			
过电流脱扣器 额定电流 (I_n)(A)	配电用	100 250 630	160 400 630	250 630 1000	400 800 1000	250 800 1250 1600	400 1000 1600	500 1250 2000	800 2000	2000 2500	2000 2500	2000 2500 3200	2500 3200	3200 4000	4000		
	保护发电机用	100 250 630	160 400 630	250 630 1000	400 800 1000	250 800 1250 1600	400 1000 1600	500 1250 2000	800 2000	2000 2500	2000 2500	2000 2500 3200	2500 3200	3200 4000	4000		
额定绝缘电压(V) AC		660															
额定工作电压(V) AC		660															
额定运行短路分断能力 I_{sc} (kA) IEC947-2	DC	400V		22/22		22/22		22/22		22/22		22/22		22/22			
		250V		40/40		40/40		40/40		80/80		85/85		85/85			
	AC	660V		30/63		30/63		30/63		30/63		30/63		50/105		50/105	
		500V		40/84		50/105		65/143		65/143		65/143		85/187		85/187	
额定短时耐受电流 I_{sw} (Ka, IS)		380V		50/105		65/143		70/154		75/165		85/187		120/264			
电 寿 命		40		40		50		70		70		85		100			
机械寿命(次)		1000		1000		1000		2500		2500		800		800			
寿命		10 000		10 000		10 000		10 000		10 000		2000		2000			
全分断时间(s)		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03			
合闸时间 (ms)	电磁型	150		150		150		150		150		150		150			
	电动机储能型	40		40		40		40		40		40		40			
外形 尺寸	固定式	a	333	418	333	418	333	418	496	626	496	626	578	738	578	738	
		b	487		487				575		575		575		575		
		c	325		325				362		362		388		388		
		d	80		80				80		80		119		119		
	抽屉式	a	350	435	350	435	350	435	540	670	540	670	622	782	622	782	
		b	505		505				645		645		655		655		
		c	478		478				537		537		566		566		
		d	42		42				60		60		106		106		
重量		电磁型 固定式/抽屉式(3极)		46/72		48/75		95/150		100/158		140/220		165/250			
飞弧距离(AC 380V 时)(mm)*				65		65		140		140		170		170			

* 有零飞弧型

生产单位:北开电气股份有限公司



(3) 正常工作条件和安装条件:

- 1) 周围空气温度为-5℃~+40℃, 且 24h 的平均值不超过+35℃ (特殊订货的除外)。
- 2) 安装地点的海拔不超过 2000m。
- 3) 安装地点的空气相对湿度在最高温度为+40℃时不超过 50%; 在较低温度下可以有较高的相对湿度, 最湿月的月平均最低温度不超过+25℃, 该月的月平均最大相对湿度不超过 90%, 并考虑因温度变化发生在产品表面上的凝露。
- 4) 污染等级为 3 级。
- 5) 断路器主电路及欠电压脱扣器线圈、电源变压器初级线圈的安装类别为Ⅳ, 其余辅助电路、控制电路安装类别为Ⅲ。
- 6) 断路器应按本说明书安装要求安装。断路器的垂直倾斜度不超过 5°。
- 7) 断路器安装在柜体小室内, 且加装门框, 防护等级达 IP40; 加装门框及密封透明罩, 防护等级达 IP54。

(4) 组成。断路器有固定式和抽屉式之分, 把固定式断路器本体装入专用的抽屉座就成为抽屉式断路器。断路器本体由触头系统、灭弧系统、操作系统、电流互感器、智能型控制器和辅助开关、二次插接件、失电压、分励脱扣器等部件组成; 抽屉座由带有导轨的左右侧板、底座和横梁等组成。

(5) CW1 系列断路器主要技术参数见表 2.2-35。

4.5.1.4 H-DW14 系列船用框架式低压断路器

(1) 概述。H-DW14 系列船用框架式低压断路器适用于交流 500V 及以下, 频率 50Hz 三相船舶电力线路中作为过载、短路保护及欠电压保护, 以及在正常的工作条件下供这种线路不频繁的转换使用。

(2) 型号说明:



(3) 断路器适用于下列工作条件:

- 1) 周围空气温度为-5℃~+50℃。
- 2) 空气相对湿度不大于 95%。
- 3) 有盐雾、有霉菌、有凝露、有油气。
- 4) 有倾斜≤30°。
- 5) 有摇摆≤45°。
- 6) 有振动。
- 7) 有冲击。

(4) 断路器主要特点:

- 1) 体积小, 具有高的断流容量和高的电动稳定性。
- 2) 抽屉式结构, 使用方便。
- 3) 操作方式简单。
- 4) 多种保护方式, 保护特性完善。
- 5) 具有遥控电动分励和近距离手动脱扣。

(5) 断路器型式:

- 1) 合闸方式: 电磁铁合闸 (手动合闸作为检修、调整断路器时使用)。
- 2) 脱扣器型式:
 - a. 过电流脱扣器有电子式过电流脱扣器 (长延时、短延时、瞬时、予报警) 和电磁式瞬时过电流脱扣器两种。
 - b. 分励脱扣器。
 - c. 电容器脱扣装置。
 - d. 欠电压脱扣器。

(6) 断路器主要技术参数见表 2.2-36 和表 2.2-37, 外形和安装尺寸如图 2.2-12~图 2.2-14 所示。

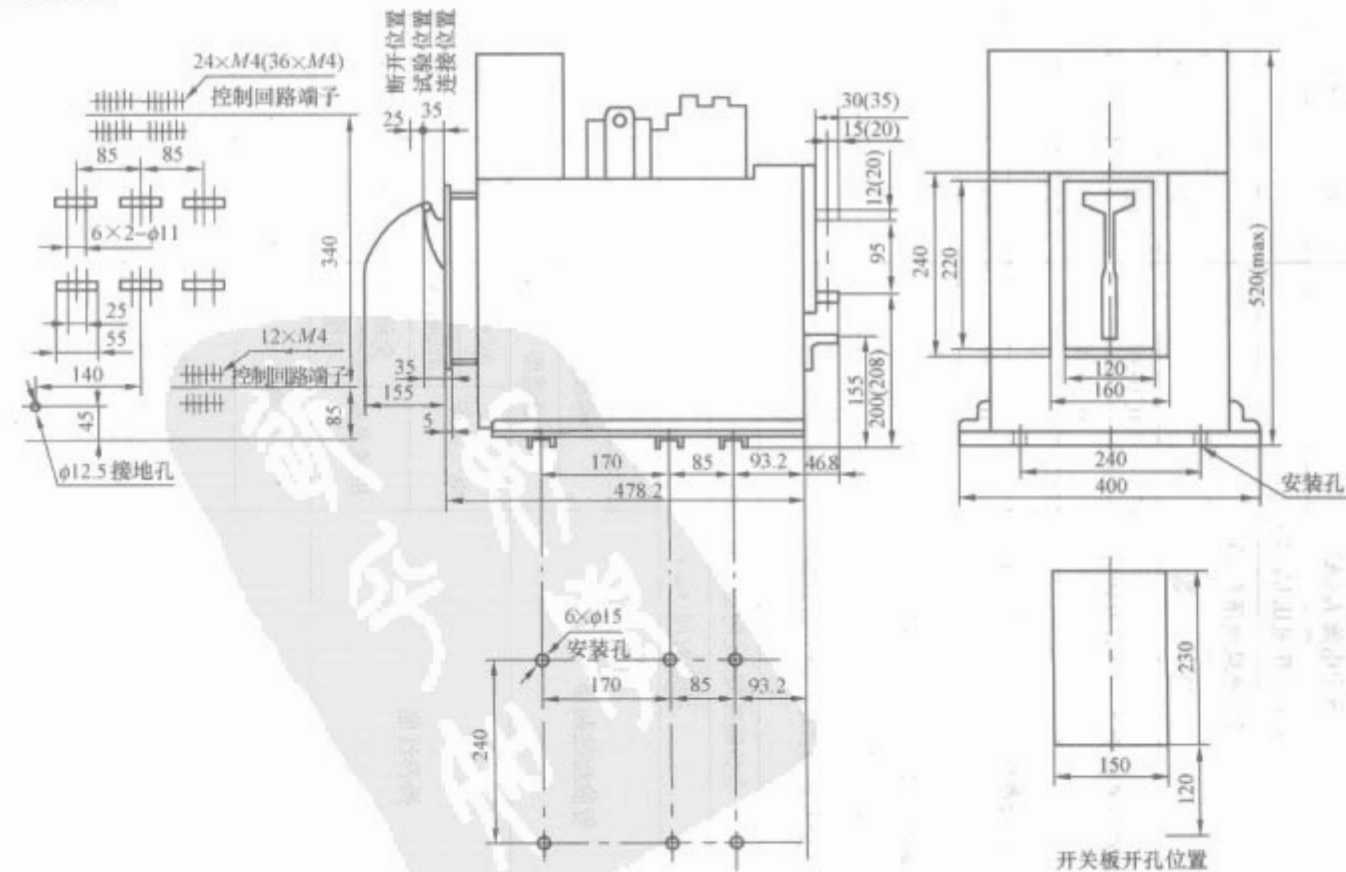


图 2.2-12 H-DW14-1000/1000G 型断路器外形及安装尺寸
() 中尺寸为 1000G 型尺寸

CW1 系列断路器主要技术参数

型 号		CW1-2000										CW1-3200				CW1-4000		CW1-5000
框架等级额定电流 $I_{rm}(A)$		2000										3200				4000		5000
额定电流 $I_n(A)$		630	800	1000	1250	1600	2000	2000	2000	2500	2900	3200	3600	4000	5000			
额定工作电压 $U_e(V)$		AC50Hz 400,600																
额定绝缘电压 $U_i(V)$		AC50Hz 1000																
极 数		3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3			
额定极限短路分断能力 $I_{cs}(kA)$ (有效值)	AC400V	80	80	80	80	80	80	80	80	100	100	100	100	100	120			
	AC690V	50	50	50	50	50	50	50	50	65	65	65	65	75	75			
额定运行短路分断能力 $I_{cs}(kA)$ (有效值)	AC400V	50	50	50	50	50	50	50	50	80	80	80	80	80	100			
	AC690V	50	50	50	50	50	50	50	50	65	65	65	65	65	65			
额定短路接通能力 $I_{cm}(kA)$ (峰值)	AC400V	176	176	176	176	176	176	176	176	220	220	220	220	220	264			
	AC690V	105	105	105	105	105	105	105	105	143	143	143	143	165	165			
额定短时耐受电流 $(I_s)I_{tw}(kA)$ (有效值)	AC400V	50	50	50	50	50	50	50	50	80	80	80	80	80	100			
	AC690V	40	40	40	40	40	40	40	40	65	65	65	65	65	65			
全分断时间(无附加延时)(ms)		25~30																
闭合时间(ms)		最大 70 max 70																
智能型控制器	电子型	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	标准型	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	通信型	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
操作性能	电气寿命	AC400V	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500		
		AC690V	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500		
	免维护	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2000	2000		
	机械寿命	有维护	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	8000	8000	8000		
安 装	联接方式	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平 垂直	水平		
	型式	抽屉式	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		固定式	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	外形尺寸(mm) $H \times W \times L$		H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	H W L	

表 2.2-36 H-DW14 系列断路器主要技术参数

型 号	H-DW14-1000 (AS-10)	H-DW14-1000G	H-DW14-2000 (AS-20)	H-DW14-2500	H-DW14-4000
额定绝缘电压 (V)	500	500	500	660	660
额定电流 (A)	1000	1000 1600	2000	2500	4000
额定运行短路分断能力 I_{cn}	500V 40kA	390V 65kA	500V 50kA	390V 75kA	390V 100kA
额定极限短路分断能力 I_{cu}	500V 40kA	390V 70kA	500V 50kA	390V 75kA	390V 100kA
额定短时耐受电流 (kA) I_{cw} 0.5s	40	50	50	60	80
机械寿命 (次)	2500	2500	1700	1700	1500
电寿命 (次)	800	800	800	800	500
飞弧距离 ^① (mm)	115 ^②	65	135 ^②	140	170
质量 (kg)	80	85	160	190	260

① 飞弧距离自电子脱扣器顶端计算。
② 为 500V 条件下值。

表 2.2-37 过电流脱扣器保护特性参数

断 路 器 型 号				H-DW14-1000 H-DW14-1000G	H-DW14-2000 H-DW14-2500	H-DW14-400
电 子 型	配 电 用	长延时	整定电流 I_{r1} (A) 延时时间 T_1 (s)	$I_0 \times (0.8 \sim 0.9 \sim 1.0 \sim 1.10)$ 连续可调		
				$\leq I_{r1} \times 105\%$ 不动作; $\geq I_{r1} \times 120\%$ 动作		
				在 $I_{r1} \times 600\%$ 时 5~30s 连续可调,($I_{r1} \times 150\%$ 时,120~180s; $I_{r1} \times 200\%$ 时,60~120s)		
				推荐选用:5、10、15、20、25、30s,误差 $\pm 15\%$		
		短延时	整定电流 I_{r2} (A) 延时时间 T_2 (ms)	$I_0 \times (4 \sim 10)$ 连续可调,误差 $\pm 15\%$		
				$I_{r2} \times 1.2$ 以上时,120~420ms,连续可调		
				推荐选用:120、170、220、270、320、370、420ms		
	瞬时	整定电流 I_{r3} (A)	$I_0 \times (4 \sim 16)$ 连续可调,误差 $\pm 20\%$			
	保 护 发 电 机 用 A 种	长延时	整定电流 I_{r1} (A) 延时时间 T_1 (s)	$I_0 \times 1.0;1.05;1.10;1.15;1.25$,误差 $\pm 5\%$		
				在 $I_{r1} \times 120\%$ (或 115%)时,15~60s,连续可调		
				推荐选用:15、20、25、30、35、40、45、50、55、60s,误差 $\pm 15\%$		
		短延时	整定电流 I_{r2} (A) 延时时间 T_2 (ms)	$I_0 \times (2.0 \sim 4.0)$ 连续可调,误差 $\pm 10\%$		
				$I_{r2} \times 1.2$ 以上时,120~420ms,连续可调		
				推荐选用:120、170、220、270、320、370、420ms		
		予报警	整定电流 I_p (A) 延时时间 T_p (s)	$I_{r1} \times (0.82 \sim 0.84 \sim 0.86 \sim 0.88 \sim 0.90 \sim 0.92 \sim 0.94 \sim 0.96)$ 连续可调,误差 $\pm 5\%$		
	在 $I_{r1} \times 120\%$ (或 115%)时,5~10s,推荐选用:10s,误差 $\pm 15\%$					
	保 护 发 电 机 用 B 种	长延时	整定电流 I_{r1} (A)	$I_0 \times (1.5 \sim 2.5)$,误差 $\pm 10\%$		
			延时时间 T_1 (s)	1.5 倍 I_{r1} ;20s,误差 $\pm 10\%$		
短延时		整定电流 I_{r3} (A)	$I_0 \times (2 \sim 5)$,误差 $\pm 10\%$			
		延时时间 T_2 (ms)	1.5 倍 I_{r2} ;75、185、315ms			
电磁型	瞬时整定电流(kA)误差 $\pm 20\%$			5~15	7.5~20	10~40

生产单位: 北开电气股份有限公司。

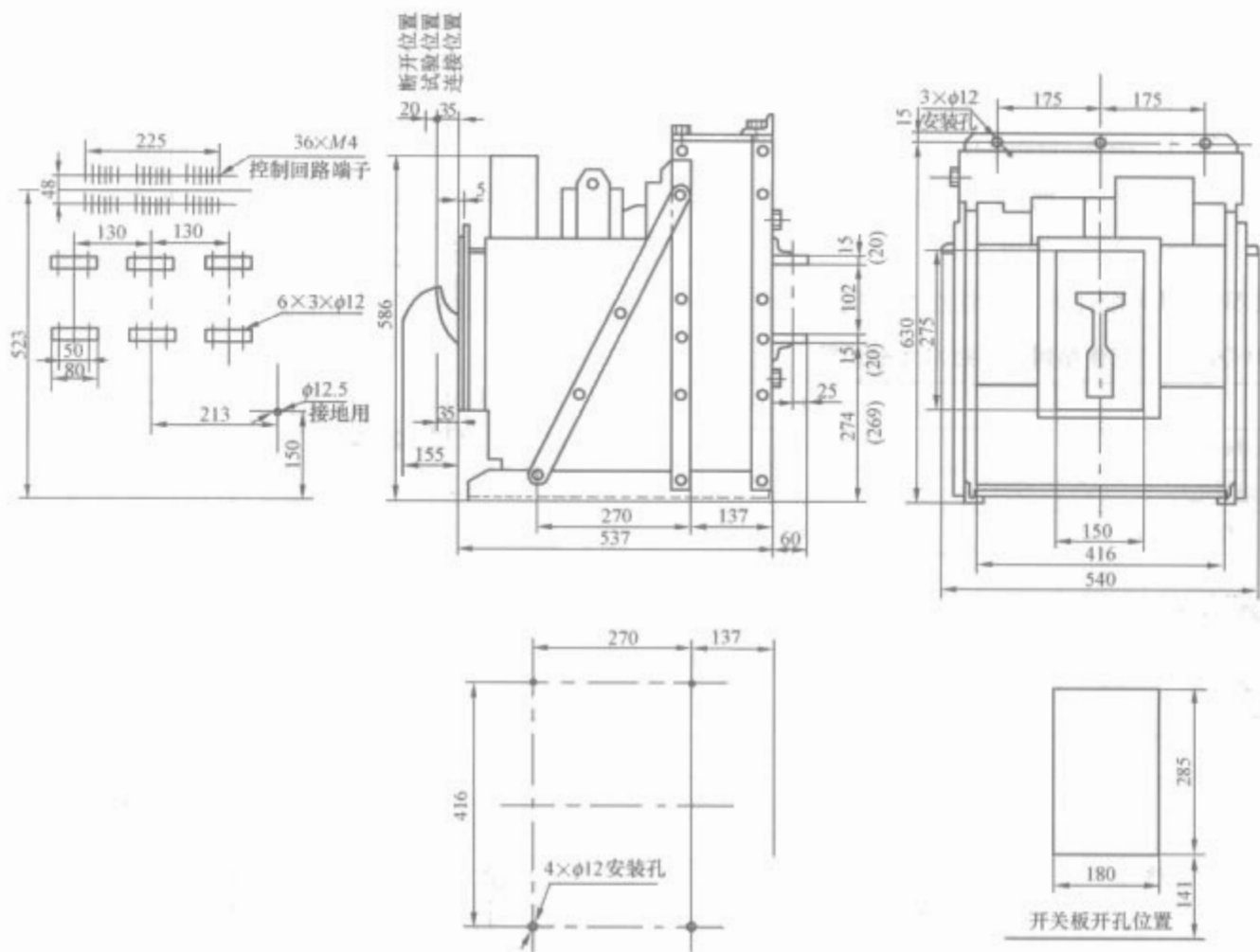


图 2.2-13 H-DW14-2000 舰用框架式低压断路器外形和安装尺寸
()中尺寸为 H-DW14-2500 型尺寸

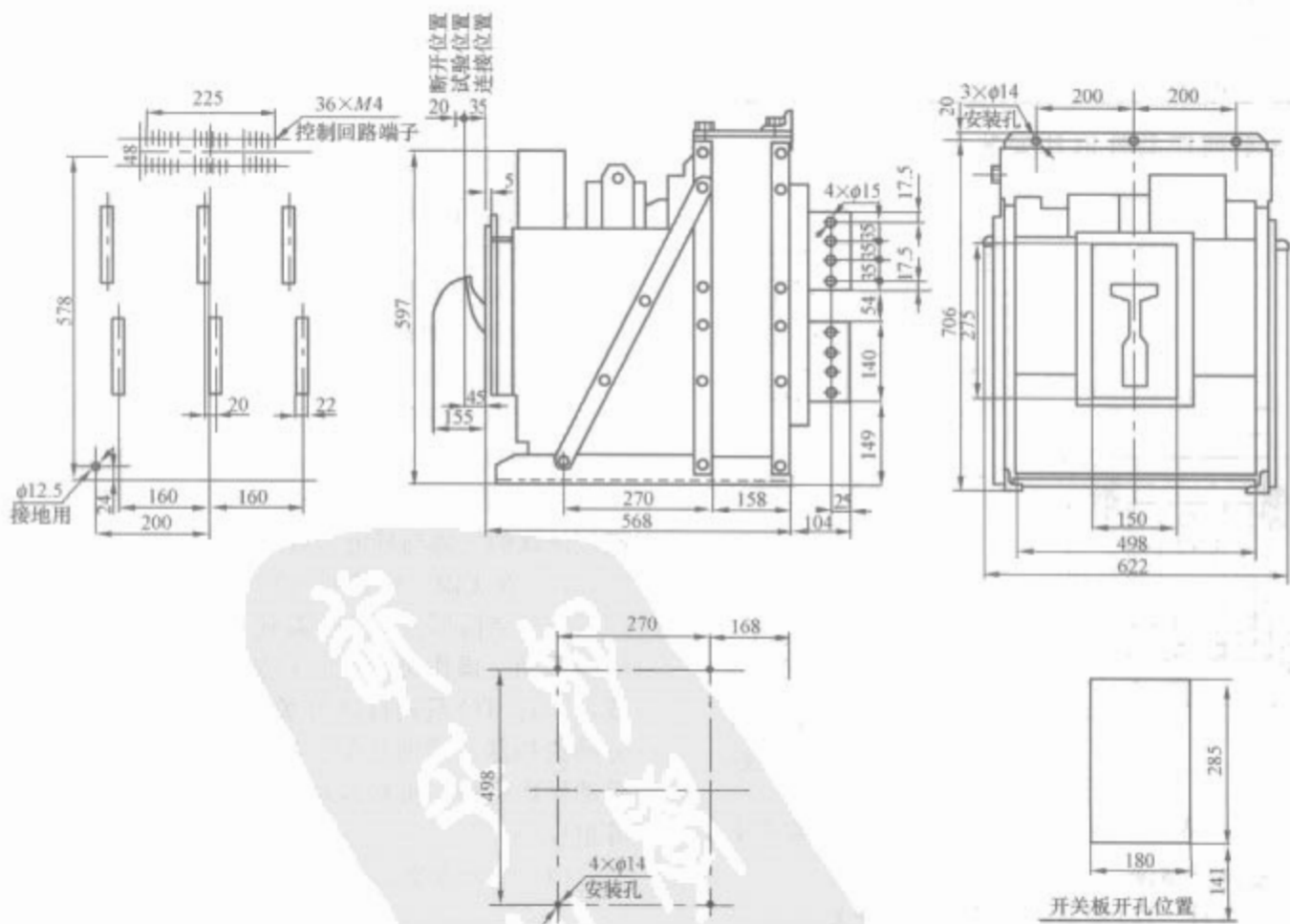


图 2.2-14 H-DW14-4000 舰用框架式低压断路器外形尺寸

4.5.1.5 H-DW18 系列舰用框架断路器

(1) 概述。H-DW18 系列舰用框架断路器是最新开发的新一代舰用框架断路器，具有长延时、短延时、瞬时、欠电压、分励等保护功能，具有通信功能，能实现遥测遥调通信

功能。H-DW18 系列舰用框架断路器由电动和手动储能操作机构、导电回路、触头系统、灭弧系统、自由脱扣机构、智能脱扣器、电磁铁瞬动脱扣器、应急锁扣、零飞弧装置和辅助开关等部分组成。

表 2. 2-39 TH-5DB、TH-5SB 型断路器主要技术参数

型 号	接线方式	极数	额定电流 (A)	额定电压 (V)	短路通断电流 (A)	保护特性整定温度 (℃)	长期倾斜	质 量 (kg)
TH-5DB	插入式	2	10、15	AC240	500	40/45	<22.5°	0.28
		2	20、30	AC125				0.34
TH-5SB	表面接线式	1	40、50	AC240	300			0.16
				AC120	500			
				DC125	1000			

表 2. 2-40 TG-30 型断路器动作特性

脱扣器额定电流 (A)	热动型脱扣器 (环境温度+45℃)			电磁脱扣器动作电流 (A)
	105% I_e (起始状态; 冷态) 不动作时间 (h) 以内	133% I_e (起始状态; 热态) 动作时间 (h) 以内	200% I_e (起始状态; 冷态) 动作时间 (m) 以内	
15、20、30	1	1	2	10 I_e ±20%

表 2. 2-41 TO-100BA 型断路器动作特性

脱扣器额定电流 (A)	热动型脱扣器 (环境温度+45℃)			电磁脱扣器动作电流 (A)
	105% I_e (起始状态; 冷态) 不动作时间 (h) 以内	135% I_e (I_e <63A) 125% I_e (I_e >63A) (起始状态; 热态) 动作时间 (h) 以内	200% I_e (起始状态; 冷态) 动作时间 (m) 以内	
13、20、30	1	1	2	10 I_e ±20%
40、50			4	
60			6	
75、100	2	2	6	

TG-30 型自动开关的热动型脱扣器具有反时限特性, 电磁脱扣器为瞬动动作, 动作特性见表 2. 2-40。

TO-100BA 型自动开关的热动型脱扣器具有反时限特性, 电磁脱扣器为瞬动动作, 动作特性见表 2. 2-41。

TG-30 型自动开关的短路通断能力符合表 2. 2-42 规定, TO-100BA 型自动开关的短路通断能力符合表 2. 2-43 规定, 短路通断能力试验后自动开关可以继续使用, 但不再要求断开短路电流。

表 2. 2-42 TG-30 型断路器短路通断能力

型号	通 断 能 力				飞弧距离 (mm)
	试验电压 (V)	通断电流 (kA)	频率 (Hz)	功率因素	
TG-30BA	440×1.1	30	60	0.15~0.20	120
	380×1.1	30	50	0.15~0.20	120

表 2. 2-43 TO-100BA 型断路器短路通断能力

型号	通 断 能 力				飞弧距离 (mm)
	试验电压 (V)	通断电流 (kA)	频率 (Hz)	功率因素	
TO-100BA	440×1.1	12	60	0.15~0.20	120
	380×1.1	18	50	0.15~0.20	120

TG-30 型自动开关的寿命见表 2. 2-44, TO-100BA 型自动开关的寿命见表 2. 2-45。

表 2. 2-44 TG-30 型断路器寿命参数

型号	电压 (V)	电流 (A)	功率 因数	试 验 次 数			操作 频率 (次/h)
				有载 (次)	无载 (次)	总计 (次)	
TG-30	440	I_e	0.8±0.1	6000	4000	1000	240

表 2. 2-45 TO-100BA 型断路器寿命参数

型号	电压 (V)	电流 (A)	功率 因数	试 验 次 数			操作 频率 (次/h)
				有载 (次)	无载 (次)	总计 (次)	
TO-100BA	440	I_e	0.8±0.1	6000	4000	1000	240

TG-30 型自动开关的过载性能符合表 2. 2-46 的要求, TO-100BA 型自动开关的过载性能符合表 2. 2-47 的要求。

表 2. 2-46 TG-30 型断路器过载性能参数

型号	电压 (V)	电流 (A)	功率 因数	试 验 次 数			操作 频率 (次/h)
				手动分断 (次)	自动分断 (次)	总计 (次)	
TG-30	440× 1.1	6 I_e	0.5±0.05	20	5	25	240

表 2. 2-47 TO-100BA 型断路器过载性能参数

型号	电压 (V)	电流 (A)	功率 因数	试 验 次 数			操作 频率 (次/h)
				手动分断 (次)	自动分断 (次)	总计 (次)	
TO-100BA	440× 1.1	6 I_e	0.5±0.05	20	5	25	240

(6) 订货须知: 订货时请注明:

- 1) 自动开关的型号、名称。
- 2) 脱扣器的额定电流。
- 3) 自动开关的数量。
- 4) 附属装置的名称、符号、组合方式。

备注: 用户如需订购 TH 型表面接线式自动开关的嵌入式安装板时, 必须注需相应得极数。

生产厂: 嘉兴电气控制设备厂。

4. 5. 2. 2 CM1 系列塑料外壳式断路器

(1) 概述。CM1 系列塑料外壳式断路器其额定绝缘电压为 800V(CM1-63 为 500V), 适用于交流 50Hz, 额定工作电压 690V 及以下(CM1-63 为 400V), 额定工作电流至 800A 的电路中作不频繁起动(CM1-800 无电动机保护型)之用。断路器具有过载、短路和欠电压保护功能, 能保护线路和电源设备不受损坏。

断路器按照其额定极限短路分断能力 (I_{cu}) 的高低分为 C 型 (基本型)、L 型 (标准型)、M 型 (较高分断型)、H 型 (高分断型) 四类。该断路器具有体积小、分断高、飞弧距离短 (部分规格零飞弧)、抗振动等特点, 并通过了核工业条件 (IE 级) 试验和船舶条件的试验。

该断路器产品执行下列标准:

IEC 60947—1 及 GB/T 14048.1—2000 总则

IEC 60947—2 及 GB 14048.2—2001 低压断路器

IEC 60947—4 及 GB 14048.4—1993 接触器和电动机起动器

IEC 60947—5.1 及 GB 14048.5—2001 机电式控制电路电器

该断路器获国家强制性产品认证“CCC”标志和德国“TUV”(莱茵)公司“CE”认证。

(2) 工作环境:

1) 周围介质温度不高于+40℃(对船用产品为+45℃)和不低于-5℃,且24h的平均值不超过+35℃(对船用产品为+40℃)。

2) 海拔2000m及以下。

3) 安装地点的空气相对湿度在最高温度为+40℃时不超过50%,在较低温度下可以有较高的相对湿度,例如20℃时达到90%。对由于温度变化偶尔产生的凝路应采取特殊措施。

4) 污染等级为3级。

5) 断路器主电路及欠电压脱扣器安装类为Ⅲ,其余辅助电路、控制电路安装类别为Ⅱ。

6) 断路器能耐受潮湿空气、盐雾、油雾、霉菌、核辐射的影响。

7) 断路器安装的最大倾斜度为±22.5°。

8) 断路器在受到船舶正常振动时能可靠工作。

9) 断路器在受到地震情况下(4g)能可靠工作。

10) 断路器应安装在无爆炸危险和无导电尘埃、无足以腐蚀金属破坏绝缘的气体 and 导电尘埃的地方。

11) 断路器应安装在没有雨雪侵袭的地方。

(3) 型号及其含义如下:



注: ① 配电用断路器无代号; 保护电动机用断路器以2表示。
② 直接操作无代号, 电动操作用P表示, 转动手柄操作用Z表示。

表 2.2-48 CM1 系列保护特性 (配电用)

断路器额定电流 (A)	热动型扣器 (环境温度 陆用+40℃ 船用+45℃)		电磁脱扣器动作电流 (A)
	1.05I _n (冷态) 不动作时间 (h)	1.30I _n (热态) 动作时间 (h)	
10≤I _n ≤63	1h 内不动作	≤1	10I _n ±20%
63<I _n ≤100	2h 内不动作	≤2	
100<I _n ≤800	2h 内不动作	≤2	5I _n ±20% 10I _n ±20%

注 CM1-160 及 CM1-225 中的 100A、125A、140A 规格中无 5I_n 电磁脱扣器。

表 2.2-49 CM1 系列保护特性 (保护电动机用)

断路器额定电流 (A)	热动型扣器 (环境温度 陆用+40℃ 船用+45℃)				脱扣 级别	电磁脱扣器 动作电流 (A)
	1.0I _n (冷态) 不动作时间 (h)	1.2I _n (热态) 不动作时间 (h)	1.5I _n (热态) 不动作时间 (min)	7.2I _n (冷态) 不动作时间 (s)		
10≤I _n ≤225	2h 内不动作	≤2	≤4min	4<T _p ≤10	10	12I _n ±20%
225<I _n ≤630			≤8min	6<T _p ≤20	20	

注 CM1-800 无电动机保护型。

(4) 分类:

1) 按产品极数分为二极 (100A、160A、225A)、三极、四极。四极产品中性极 (N) 的型式分四种:

A 型: N 极不安装过电流脱扣器, 且 N 极始终接通, 不与其他三极一起合分。

B 型: N 极不安装过电流脱扣器, 且 N 极与其他三极一起合分 (N 极先合后分)。

C 型: N 极安装过电流脱扣器, 且 N 极与其他三极一起合分 (N 极先合后分)。

D 型: N 极安装过电流脱扣器, 且 N 极始终接通, 不与其他三极一起合分。

2) 按额定电流 (A) 分:

CM1-63 为 (6)、10、16、20、25、32、40、50、63A 九级 (6A 规格无过载保护)。

CM1-100 为 (10)、16、20、25、32、40、50、63、80、100A 十级。

CM1-160 为 100、125、140、160A 四级。

CM1-225 为 100、125、140、160、180、200、225A 七级。

CM1-400 为 225、250、315、350、400A 五级。

CM1-630 为 400、500、630A 三级。

CM1-800 为 630、700、800A 三级。

带 () 为不推荐规格。

3) 按接线方式分为板前接线、板后接线、插入式板前接线、插入式板后接线四种。

4) 按过电流脱扣器型式分热动-电磁 (复式) 型、电磁 (瞬时) 型两种。

5) 按断路器是否带附件分带附件和不带附件两种, 附件分内部附件和外部附件: 内部附件有分励脱扣器、欠电压脱扣器、辅助触头、报警触头四种; 外部附件有转动手柄操作机构、电动操作机构、联锁机构及辅助装置的接线端子排等。

(5) 保护特性。断路器热动型扣器具有反时限特性, 电磁脱扣器为瞬时动作, 特性见表 2.2-48 (配电用) 及表 2.2-49 (保护电动机用)。

(6) CM1 系列主要技术性能指标见表 2.2-50。

表 2. 2-50 CMI 系列主要技术性能指标

壳架电流 I_{nn} (A)			63			100			100			160
型号 Type			CMI-63L	CMI-63M	CMI-63	CMI-100	CMI-100C	CMI-100L	CMI-100M ^①	CMI-100 ^②	CMI-100H	CMI-160C
额定电流 I_n (A)			(6)、10、16、20、25、32、40、50、63			(10)、16、20、25、32、40、50、63、80、100			(10)、16、20、25、32、40、50、63、80、100			100、125、140、160
极数			3	3	4	2	3	3	3	4	3	3
额定绝缘电压 U_i (V)			AC500			AC800						
额定工作电压 U_e (V)			AC400			DC250、AC400	AC400	AC400	AC400	AC400	AC400	AC400
飞弧距离 (mm)			0			≤50	0(≤50) ^②	0(≤50) ^②				
额定极限短路分断能力 I_{cs} (kA)	AC69V									10		
	AC400V		25		50	50	25	35		50	85	25
	DC250V					20						
额定运行短路分断能力 I_{sa} (kA)	AC690V									10		18
	AC400V		18		35	35		22		35	50	
	DC250V					15	18					
操作性能(次)	通电		6000									
	不通电		8500									
外形尺寸(mm)	W	78	78	78	103	65	92	92	92	122	92	107
	L	135			135	150	150	150		150		165
	H	75.3			81.5	86	68	68	86			
分励脱扣器		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
欠电压脱扣器		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
辅助触头		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
报警触头		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
电机操作机构		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
转动手柄操作机构		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

续表

壳架电流 I_{en} (A)			160			225			225		
型号 Type			CM1-160L	CM1-160M	CM1-160	CM1-160H	CM1-160	CM1-160H	CM1-160	CM1-160H	CM1-225H
额定电流 I_n (A)			100、125、140、160								
极数			3	3	4	3	2	3	3	3	3
额定绝缘电压 U_i (V)			AC800								
额定工作电压 U_e (V)			AC400	AC400 AC690	AC400	AC400	DC250、AC400	AC400	AC400	AC400 AC690	AC400
飞弧距离 (mm)			≤ 50								
额定极限短路分断能力 I_{sc} (kA)	AC690V			10						10	
	AC400V	35		50		85	50	25	35	50	85
	DC250V						20				
额定运行短路分断能力 I_{sc} (kA)	AC690V			10						10	
	AC400V	25		35		50	35	18	25	35	50
	DC250V						15				
操作性能 (次)			3000								
			7000								
外形尺寸 (mm)	W	107	107	142	107	107	75	107	107	142	107
	L	165		165			165	165		165	
	H	86		103			103	86		103	
分励脱扣器			○	○		○	○	○	○	○	○
欠电压脱扣器			○	○		○	○	○	○	○	○
辅助触头			○	○		○	○	○	○	○	○
报警触头			○	○		○	○	○	○	○	○
电机操作机构			○	○		○	○	○	○	○	○
转动手柄操作机构			○	○		○	○	○	○	○	○

续表

壳架电流 I_{mn} (A)		400				630				800			
型号 Type		CMI-400C	CMI-400L	CMI-400M ^①	CMI-400H ^①	CMI-630C	CMI-630L	CMI-630M ^①	CMI-630 ^①	CMI-630H	CMI-800M ^①	CMI-800 ^②	CMI-800H
额定电流 I_n (A)		225、250、345、350、400 400、500、630 630、700、800											
极数		3	3	3	3	3	3	3	4	3	3	4	3
额定冲击绝缘电压 U_i (V)		AC800											
额定冲击耐受电压 U_{imp} (V)		8000											
额定工作电压 U_c (V)		AC400		AC400 AC690		AC400		AC400 AC900		AC400		AC400 AC690	
飞弧距离(mm)		≤100											
额定极限短路分断能力 I_{sc} (kA)	AC690V			15				15			20		
	AC400V	35	50	65	100	35	50	65		100	75		100
	AC690V			15				15			20		
	AC400V	25	35	42	65	25	35	42		65	50		65
操作性能(次)	通电	2000											
	不通电	4000											
外形尺寸(mm)	W	182		240		182		240		182		280	
	L	270		270		270		270		270		280	
	H	110		110		110		110		110		115.5	
分励脱扣器		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
欠电压脱扣器		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
辅助触头		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
报警触头		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
电机操作机构		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注 极限分断与飞弧距离包含横装与竖装。
① 该型号可倒进线,其余不可倒进线,即只可以1,3,5接电源线,2,4,6接负载线。
② CMI-100 飞弧与500mm 两种,应在订货时注明,四机断路器及690V 规格无“0”飞弧。

4.5.2.3 H-DZ28 系列舰用交流高分断塑壳断路器

(1) 概述。该断路器适用于交流 50Hz、额定电压 380V 及以下，估算短路电流达 100kA 及以下的舰船电力系统配电线路中，作为分配电能和保护线路及电源设备的过载、短路及在正常工作条件下作不频繁接通和断开线路之用。

该断路器能在-25℃~+50℃周围空气温度，45°的倾斜摇摆和有潮湿空气、盐雾、油雾、霉菌的环境下正常工作，且具有规定的抗冲击、振动的能力。

该断路器为专利产品，专利号为 ZL9926107.4。

(2) 结构特征。该断路器由绝缘外壳、操作机构、触头系统、脱扣器和限流装置等五部分组成，具有快速闭合、断开和自由脱扣机构，以及短路电流限制装置。脱扣器有热磁型和电子型两种，具有过载和短路保护功能。

(3) H-DZ28 系列主要技术数据见表 2.2-51~表 2.2-56。

表 2.2-51 H-DZ28 系列热磁型断路器主要技术性能指标

类 型		热 磁 型				电子型断路器	
壳体额定电流 (A)		100	250	600	1200	600	1200
脱扣器额定电流等级 (A)		15, 25, 50, 75, 100	125, 150, 175, 200, 255, 250	250, 300, 350, 400, 500, 600	700, 800, 900, 1000, 1100, 1200	175, 250, 350, 500, 200, 275, 400, 600, 225, 300	600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200
额定电压 (V)		380					
额定频率 (Hz)		50					
寿 命	电寿命	6000	4000	4000	4000	4000	4000
	机械寿命	4000	4000	4000	1000	4000	1000
	总次数	10 000	8000	8000	5000	8000	5000
额定极限短路分断能力 (kA) $\cos\varphi=0.15\sim0.20$		100					
飞弧距离 (mm)		80	150	120	150	150	
限流系数		≤ 0.12	≤ 0.25	≤ 0.30	≤ 0.45	≤ 0.30	≤ 0.45
分励脱扣器线圈额定电压		AC380V 或 220V					
辅助触头容量		AC380V 和 DC220V, 3A					

表 2.2-52 H-DZ28 系列热磁型断路器长延时保护特性

$\frac{I_t}{I_n}$	约定不脱扣时间	约定脱扣时间	起始状态
1.5	>20min	—	冷态
2.25	—	<20min	

注 I_t —脱扣器电流整定值； I_n —脱扣器额定电流。

表 2.2-53 H-DZ28 系列电子型断路器长延时保护特性

$\frac{I_t}{I_n}$	动作或不动作时间	注
1.05	2h 内不动作	冷态开始
1.3	2h 内动作	热态开始

表 2.2-54 H-DZ28 系列电子型断路器的短延时保护特性

额定工作电流 (A)	短延时整定值调节范围	短延时时间在 $6I_n$ (s)	
		可调式	不可调式
225~600	$(3\sim10) I_n$	$(0.045\sim0.13) \sim (0.16\sim0.38)$	0.063~0.20
700~1200	$(2\sim8) I_n$	$(0.045\sim0.14) \sim (0.18\sim0.42)$	0.085~0.222

表 2.2-55 H-DZ28 系列断路器的瞬时动作特性

类型	脱扣器整定电流 I_n (A)	瞬时脱扣电流整定值	整定误差
热磁型	15~1200	$(610) I_n$	$\pm 20\%$
电子型	175~300	6800A	
	300~600	6800A	
	700~1200	14 000A	

表 2.2-56 H-DZ28 系列外形尺寸

壳体等级电流 (A)	外形尺寸				安装尺寸			质量 (kg)
	a	b	c	d	E 板后/板前	f	φ	
100	205	115	180	225	182	34	8	5.5
250	308	220	214.5	244	243/348	70	9	19.7

续表

壳体等级电流 (A)	外形尺寸				安装尺寸			质量 (kg)
	a	b	c	d	E 板后/板前	f	φ	
600	321.5(424.5)	230	210	240	242.2/351.5	69.9	10	22.5
1200	469(611)	230	258	298	375/499	69.9	12	41.5

注 括号内数据为包括接线板尺寸。

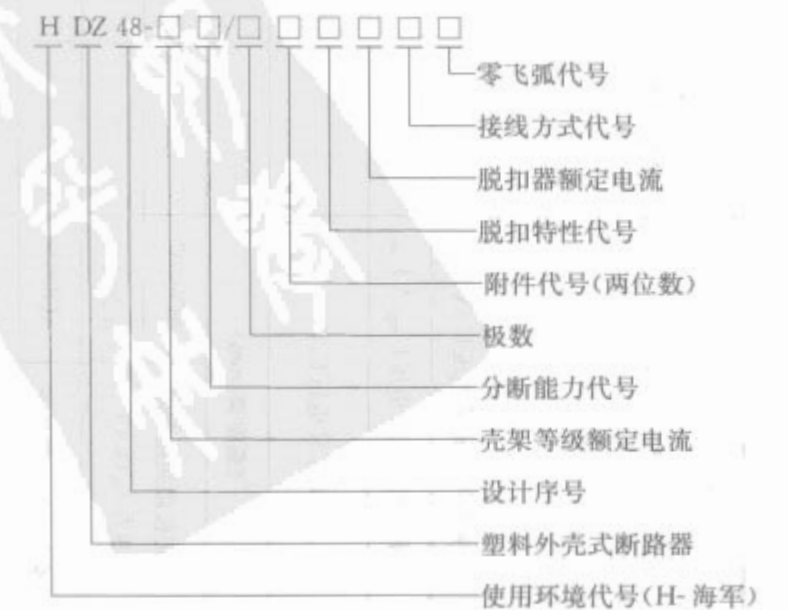
生产单位：上海电器科学研究所（集团）有限公司

4.5.2.4 H-DZ48 系列舰用塑壳断路器

(1) 概述。H-DZ48 系列舰用塑料外壳式断路器（以下简称断路器）适用于交流 50Hz、额定电压 380V 及以下的舰船电力系统配电线路中，作为分配电能和用电设备的过载、短路保护，以及在正常工作条件下作不频繁接通和断开线路之用。

断路器符合 ZJB K 34004、MIL17361F 等标准。

(2) 型号及其含义。



1) 分断能力代号:

无—表示一般分能力型, 额定极限短路分断能力为 35kA

G—表示高分断能力型, 额定极限短路分断能力为 75kA

2) 附件代号:

断路器的内部附件代号由两位阿拉伯数字组成, 其含义如下:

- 30—表示不带有任何内部附件
 - 31—表示带有分励脱扣器
 - 32—表示带有一组辅助开关
 - 33—表示带有报警开关
 - 34—表示带有分励脱扣器和一组辅助开关
 - 35—表示带有分励脱扣器和报警开关
 - 36—表示带有二组辅助开关
 - 37—表示带有欠电压脱扣器
 - 38—表示带有欠电压脱扣器和一组辅助开关
 - 39—表示带有欠电压脱扣器和报警开关
 - 40—表示带有分励脱扣器和二组辅助开关
 - 41—表示带有欠电压脱扣器和二组辅助开关
 - 42—表示带有报警开关和一组辅助开关
 - 43—表示带有报警开关和二组辅助开关
 - 44—表示带有分励脱扣器、报警开关和一组辅助开关
 - 45—表示带有欠电压脱扣器、报警开关和一组辅助开关
- 3) 脱扣特性代号:

- P—表示具有热—电磁脱扣器, 作配电保护用
- D—表示具有热—电磁脱扣器, 作电动机保护用
- S—表示仅有电磁脱扣器, 作短路保护用

4) 接线方式代号:

无—表示无插入式安装台, 板前接线式
B—表示无插入式安装台, 板后接线式
F—表示无插入式安装台, 进线为板后接线式, 出线为板前接线式

- Q—表示有插入式安装台, 板前接线式
- H—表示有插入式安装台, 板后接线式
- T—表示有插入式安装台, 进线为板后接线式, 出线为板前接线式

5) 零飞弧代号:

- 无—表示有飞弧
- W—表示零飞弧

注: 目前仅提供短路分断能力为 35kA 的零飞弧断路器。

(3) 结构。断路器由绝缘外壳、操作机构、触头系统、脱扣器和附件等部分组成。具有快速闭合, 断开和自由脱扣器。脱扣器为热磁式, 具有过载和短路保护功能。

断路器设有应急锁扣机构, 当应急锁扣处于锁紧位置时, 即使有过电流以产生, 脱扣器也不能使闭合着的断路器断开, 但手柄操作仍能使断路器灵活地断开和闭合。

(4) 工作环境。

- 1) 周围空气温度 $-25^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 有偏离海平面垂直线 45° 的倾斜和摇摆。
- 3) 能耐受海上潮湿空气、盐雾、油雾和霉菌的影响。
- 4) 能耐受 GJB5A 规定的冲击和振动。

(5) H-DZ48 系列断路器主要技术参数及特性见表 2.2-57~表 2.2-59。

表 2.2-57 H-DZ48 系列船用塑壳断路器的主要
技术性能指标

壳架等级额定电流 I_{nm} (A)		100	100G	200	200G	400	400G
脱扣器额定电流 I_n (A)		10 16 20 25 32 40 50 63 80 100		100 125 160 180 200		200 250 315 350 400	
额定电压 (V)		380					
额定频率 (Hz)		50					
极限短路分断能力 (kA) 380V $\cos\varphi=0.15\sim0.20$		35	75	35	75	35	75
寿命/次	电寿命	6000		4000		4000	
	机械寿命	4000		4000		4000	
	总寿命	10 000		8000		8000	
质量 (kg)	板前	1.25	1.35	1.50	1.80	4.50	4.95
	板后	1.70	1.80	2.10	2.40	—	—
	插入式板前	1.95	2.05	2.35	2.65	6.95	7.40
	插入式板后	2.30	2.40	2.85	3.15	6.65	7.10
外形尺寸 (mm)	W	92	92	105	105	140	140
	H	155	155	165	165	257	257
	D (板前)	69	79	69	79	105	115
飞弧距离 (mm)		50		50		80	

表 2.2-58 断路器的反时限过电流保护特性

I_r/I_n	约定不脱扣时间	约定脱扣时间	起始状态
1.5	$>20\text{min}$	—	冷态
2.25	—	$<20\text{min}$	
6	—	$<32\text{s}$	

表 2.2-59 断路器的瞬时过电流保护特性

脱扣器整定电流 I_n (A)	瞬时脱扣电流整定值		整定误差
10~400	配电保护	电动机保护	$\pm 20\%$
	$10I_n$	$12I_n$	

注 根据用户要求, 瞬时脱扣电流整定值范围可为 $(6 \sim 15) I_n$

(6) 内部附件性能。分励脱扣器的额定电压为交流 380V、220V。当分励脱扣器的电源电压保护在额定控制电源电压值的 70% 和 110% 之间时, 在断路器的所有工作条件下 (除非应急锁扣处于锁定位置) 分励脱扣器应脱扣, 使断路器断开。

欠电压脱扣器的额定电压为交流 380V、220V。当外施电源电压下降 (甚至缓慢下降) 至额定电压的 35%~70% 范围内, 欠电压脱扣器应动作, 使断路器断开; 当外施电源电压低于额定电压 35% 时, 欠电压脱扣器应防止断路器闭合; 当外施电源电压等于或高于额定电压的 35% 时, 欠电压脱扣器应防止断路器闭合。电源电压的上限值应为额定电压的 110%。

辅助开关和报警开关的额定电压为 220V, 约定发热电流为 3A。辅助开关和报警开关的寿命与断路器寿命相同。

(7) 订货规范。用户在订货时应写明：断路器型号、极数、脱扣特性、脱扣器额定电流、接线方式和内部附件要求等内容。若断路器瞬时整定值不符合规定值时，还应说明断路器的瞬时整定值。若带有分励脱扣器或欠电压脱扣器，应注明其线圈额定电压。

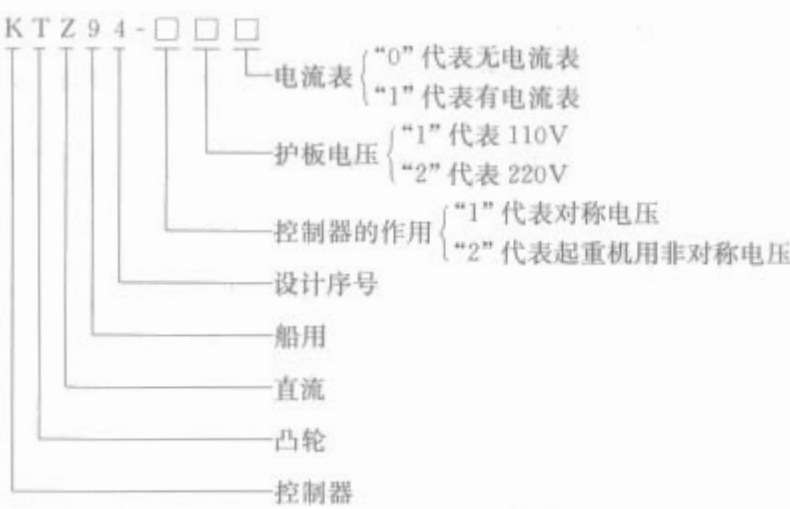
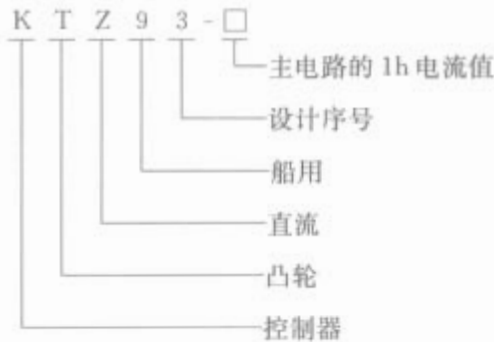
如：需订 H-DZ48-100 三极断路器五台，其掣扣特性为配电保护、脱扣器额定电流为 80A，接线方式为插入式板前接线，带一个辅助开关和一个 220V 分励脱扣器，瞬时整定值为 1000A，可写成 H-DZ48-100/334P80Q 五台，瞬时整定值为 1000A，分励脱扣器额定电压 220V。

生产单位：上海电器科学研究所（集团）有限公司

5 船用控制器

在船用电气控制设备中，用作转换主回路或励磁回路的接法和改变回路中的电阻值、以达到电动机的起动、转向和调速等目的的船用电器。

KTZ93、KTZ94 系列手动操作凸轮控制器，主要用来直接操纵可逆转的短时工作制或反复短时工作制的复激和并激直流电动机，作起动调速与运转之用。



结构简介：该控制器由外壳、手轮、接触元件及转轴上的绝缘凸轮等组成。外壳为防水式结构。接触元件的 13 对触头，其中指形主触头为 9 对，桥式辅助触头为 4 对。主触头带灭弧线圈和灭弧罩。手轮的下部装有棘轮，可使其停止于确定的位置。

在手轮逆时针方向转动时，应相当于传动装置的“抛锚”，“向下”，“向后”，“向左”，“下降”方向的运动。

手轮顺时针方向转动时，应相当于传动装置的“收锚”，“向上”，“向前”，“向右”，“上升”方向的运动。

在带保护板装置的控制器内装有：线路接触器、继电器、转换开关、以及防止无线电接受干扰的电容器等保护元件，在某些控制器内还装有电流表及分流器等元件。凡装有电流表的控制器，同时装有指示灯装置。

KTZ93、KTZ94 系列手动操作凸轮控制器的基本技术数据见表 2.2-60。

表 2.2-60 KTZ93、KTZ94 系列手动操作凸轮控制器的基本技术数据

序号	型号	线路电压 不超过 (V)	主电路 的 1h 电流 (A)	$J_c=40\%$ 时主电路 的电流 (A)	控制电路 1h 电流 (A)	$J_c=40\%$ 时电动机之最大功率 (kW)		1h 内 允许 接通 次数	总电路数		工作位置		质量 (kg)
						线路电压 (110V)	线路电压 (220V)		带有灭 弧装置	不带有灭 弧装置	上升 (向右) (抬起)	下降 (向左) (放下)	
1	KTZ93-2	320	40	40	20	3.5	7.5	300	9	4	5	5	60
	KTZ93-3		60	60		5	10						
	KTZ93-4		80	80		7.5	15						
2	KTZ94-111	110	40	40	20	3.5	7.5	300	9	4	5	5	82
	KTZ94-121	220											
3	KTZ94-111	110	80	80	20	7.5	15	300	9	4	5	5	82
	KTZ94-121	220											
4	KTZ94-110	110	40	40	20	3.5	7.5	300	9	4	5	5	78
	KTZ94-120	220											
5	KTZ94-110	110	80	80	20	7.5	15	300	9	4	5	5	78
	KTZ94-120	220											
6	KTZ94-211	110	40	40	20	3.5	7.5	300	9	4	9	5	82
			80	80		7.5	15						
7	KTZ94-221	220	40	40	20	3.5	7.5	300	9	4	9	5	82
			80	80		7.5	15						

注 KTZ94-111、121、120、211、221 都带保护板，其中 KTZ94-111、121、211、221 有指示灯和电流表，其他型号无指示灯和电流表。

6 接触器

6.1 基本原理

舰船用接触器应用于舰船电力系统中，供远距离接通和分断线路之用，并适用于频繁地起动及控制交、直流电动机。

接触器的主要组成部分包括：触头灭弧系统、电磁操作系统及传动机构。

当线圈通电后，电磁系统产生的电磁吸力克服反作用弹簧及触头弹簧的反作用力将衔铁吸向铁心，衔铁带动动触头向静触头运动至完全闭合，主电路接通。当线圈断电时，衔铁在反作用力作用下脱离铁心，带动动触头离开静触头，触头之间产生电弧。电弧在触头回路电动力及气动力或磁吹力的驱动下，在灭弧室中受到强烈冷却去游离而熄灭，主电路最后切断。

6.2 设计要点

舰船用接触器的使用环境与陆用不同，因此在设计时除了与陆用接触器一样的要求外，还需满足以下要求：

(1) 接触器具有耐霉性能，其外露于空气中的绝缘零部件经 28d 长霉试验后，长霉面积不得超过二级。

(2) 接触器具有耐盐雾性能，其外露于空气中的金属零部件经 48h 盐雾试验后，外观变化应符合表 2.2-61 的规定。

表 2.2-61 盐雾试验合格要求

镀层类别	底金属	合格要求
锌	碳钢	主要表面无浅绿色腐蚀物
镍或高锡青铜	铜和铜合金	主要表面无灰色或浅绿色腐蚀物
锡	铜和铜合金	主要表面无灰黑色腐蚀物
银、金	铜和铜合金	主要表面无铜绿

(3) 接触器具有耐湿热性能。经 55℃ 二周期（舰用为 60℃ 五周期）交变湿热试验后，其性能应符合下列规定：

1) 不同极带电部件之间，各电路带电部件与地之间绝缘电阻应不小于 10MΩ。

2) 动作值应符合有关规定。

3) 外壳不应有变形和裂缝，油漆层不应起泡和脱落。

(4) 接触器具有耐倾斜和摇摆性能。在倾斜和摇摆试验时，接触器的动作值应在规定值范围内，其动作值误差应符合产品标准规定。

(5) 接触器具有耐振动性能。在振动试验时，应无紧固件松动、机械损坏和误动作，试验后其动作值误差应在产品

标准规定范围内。

(6) 舰用接触器具有耐冲击性能。按要求进行冲击试验时，应无机械损坏，并应符合下列规定：

1) 交流：闭合的主触头断开时间不大于 200ms，断开的主触头闭合时间不大于 20ms。

2) 直流：闭合的主触头断开时间不大于 500ms，断开的主触头闭合时间不大于 75ms。

3) 闭合的辅助触头断开时间不大于 20ms，断开的辅助触头闭合时间不大于 20ms。

4) 冲击试验后，动作特性符合有关规定。

5) 冲击试验后，进行介电强度试验，试验电压值为冲击试验前的 65%。

(7) 舰用接触器具有耐颠簸性能。按规定要求进行颠簸试验时，应无机械损坏和误动作，动作特性符合有关规定。

6.3 解决措施

针对以上的要求，主要采取以下措施：

(1) 选取具有足够机械强度的材料。

(2) 绝缘零部件采用耐久、滞燃、耐潮和耐霉材料制造，不得采用有毒性或能释放出有毒性气体的材料。

(3) 金属零部件除其本身有较好的耐蚀性能外，要有可靠的防护层。

(4) 采用平衡的机构。其轴两侧的质量和力臂的乘积相等，在冲击振动情况下由惯性力引起的合力矩等于零，就不会发生机构相对于触头发生运动而产生误动作。

(5) 采用超死点技术。把机构置于越过曲柄死点的位置并抵在一个挡块上。该挡块防止机构向一个方向运动。由于曲柄存在死点，机构也不可能向另一个方向运动。

(6) 采用锁扣装置。适用于不可能通过平衡所有运动部件或采用超死点的方法达到抗冲击的机构。锁扣装置有磁性、惯性和手动等。

(7) 采用不可逆机构。有蜗轮和蜗杆装置或螺旋凸轮等。

6.4 国内产品

国内交流接触器主要产品有 CJ91、CJ98、CJ914、CJ914-Z、CJ920、CJC1、3TF、3TB、CT91、CJX4-C、GSC1-C、LC1-D、LC2-D、LP1-D、SC 等系列船用接触器。

国内直流接触器主要产品有 CS91、CT91、LC1-D、LP1-D 等系列，CZH-15 型船用接触器。

LC1 系列接触器主要技术数据见表 2.2-62，外形尺寸见表 2.2-63。

表 2.2-62 LC1 系列接触器主要技术数据

型 号		LC1-D09	LC1-D12	LC1-D18	LC1-D25	LC1-D32	LC1-D38	LC1-D40
额定绝缘电压 (V)		1000						
额定运行电流 (A) ($U_e \leq 440V$)	AC-3 (55℃)	9	12	18	25	32	38	40
	AC-1 (55℃)	25	25	32	40	50	50	60
AC-3 使用类别时在各运行电压下的额定运行功率 (kW)	220/240V	2.2	3	4	5.5	7.5	9	11
	380/400V	4	5.5	7.5	11	15	18.5	18.5
	415V	4	5.5	9	11	15	18.5	22
	440V	4	5.5	9	11	15	18.5	22
	500V	5.5	7.5	10	15	18.5	18.5	22
	660/690V	5.5	7.5	10	15	18.5	18.5	30
	1000V	—	—	—	—	—	—	22

续表

型 号		LC1-D09	LC1-D12	LC1-D18	LC1-D25	LC1-D32	LC1-D38	LC1-D40
AC-2 和 AC-4 使用类别时， 在各运行电压下，20 万次操作 所允许的额定功率（kW）	220/230V	1.5	1.5	2.2	3	4	4	4
	380/400V	2.2	3	4	5.5	7.5	7.5	9
	415V	2.2	3	3.7	5.5	7.5	7.5	9
	440V	2.2	3	3.7	5.5	7.5	7.5	11
	500V	3	4	5.5	7.5	9	9	11
	660/690V	4	5.5	7.5	10	11	11	15
型 号		LC1-D50	LC1-D65	LC1-D80	LC1-D95	LC1-D115	LC1-D150	LC1-D170
额定绝缘电压（V）		1000						
额定运行电流（A） $(U_e \leq 440V)$	AC-3（55℃）	50	65	80	95	115	150	170
	AC-1（55℃）	80	80	125	125	200	200	200
AC-3 使用类别时在各运行电 压下的额定运行功率（kW）	220/240V	15	18.5	22	25	30	40	55
	380/400V	22	30	37	45	55	75	90
	415V	25	37	45	45	59	80	100
	440V	30	37	45	45	59	80	100
	500V	30	37	55	55	75	90	110
	660/690V	33	37	45	45	80	100	110
	1000V	30	37	45	45	75	90	100
AC-2 和 AC-4 使用类别时， 在各运行电压下，20 万次操作 所允许的额定功率（kW）	220/230V	5.5	7.5	7.5	9	9	11	22
	380/400V	11	11	15	15	18.5	22	40
	415V	11	11	15	15	18.5	22	45
	440V	11	15	15	15	18.5	22	45
	500V	15	18.5	22	22	30	37	51
	660/690V	18.5	22	25	25	30	45	63
型 号		LC1-D205	LC1-D245	LC1-D300	LC1-D410	LC1-D475	LC1-D620	
额定绝缘电压（V）		1000						
额定运行电流（A） $(U_e \leq 440V)$	AC-3（55℃）	205	245	300	410	475	620	
	AC-1（55℃）	275	315	400	500	700	1000	
AC-3 使用类别时在各运行电 压下的额定运行功率（kW）	220/240V	63	75	100	110	147	200	
	380/400V	110	132	160	220	265	335	
	415V	110	132	180	220	280	375	
	440V	110	132	200	250	280	400	
	500V	129	160	200	250	335	400	
	660/690V	129	160	220	280	335	450	
	1000V	100	147	160	185	335	450	
AC-2 和 AC-4 使用类别时， 在各运行电压下，20 万次操作 所允许的额定功率（kW）	220/230V	25	30	37	40	45	55	
	380/400V	45	55	63	75	80	100	
	415V	51	59	75	80	90	100	
	440V	51	63	75	80	100	110	
	500V	59	75	80	90	110	132	
	660/690V	75	90	110	129	140	160	

表 2.2-63 LCI 系列接触器外形尺寸

续表

接触器型号	外形尺寸 (mm)		
	长	宽	高
LC1-D09、D12	74	45	80
LC1-D18			85
LC1-D32、D38	84	56	99
LC1-D40、D50、D65	127	72	114
LC1-D80、D95	127	76	125
LC1-D115、D150、D170	158	120	132

接触器型号	外形尺寸 (mm)		
	长	宽	高
LC1-D205	174	168.5	181
LC1-D245	197	168.5	181
LC1-D300	206	213	219
LC1-D410	206	213	219
LC1-D475	238	233	232
LC1-D620	304	309	255

CJ914 系列交流接触器由触头系统、磁系统、防冲击机构组成，直动式立体布置，所有零件均装在高强度胶木躯壳上，触头系统全部采用桥形双断点触头，联锁触头全部采用

桥形随动式银触头，磁系统均为不对称双山型，并采用单轴平衡防冲击机构。

CJ914 系列接触器主要技术数据见表 2. 2-64。

表 2. 2-64 CJ914 系列接触器主要技术数据

型 号	额定电压 (V)	额定电流 (A)	吸引线圈电压 (V)	主触头			联锁触头				
				数量	电压 (V)	电流 (A)	数量	额定电流 (A)	电压 (V)	接通电流 (A)	分断电流 (A)
CJ914-10	380	10	24、110、 220、380	3 动合	380× 1. 06	10×10	2 动合 2 动断	5	380×1. 06	50	5
CJ914-20		20				20×10					
CJ914-40		40				40×10					
CJ914-80		80				80×10					
CJ914-150		150				150×10					

6. 5 选用

6. 5. 1 按使用类别选用

接触器用于不同使用类别，其工作条件存在很大差异。例如用于控制 AC-3 负载时，接触器需断开 $8I_e$ 的电动机额定工作电流，触头恢复电压为 $1. 05U_e$ 。用于控制 AC-4 类负载时，接触器要断开 $10I_e$ 的电动机额定工作电流，触头恢复电压为 $1. 05U_e$ 。

6. 5. 2 考虑操作频率的影响

在操作频率很高的情况下，必须计及电弧能量的影响，在等效发热电流计算值的基础上留下适当的余量来选择接触器的容量等级。

6. 5. 3 工作电压与容量的关系

接触器使用在不同的工作电压时，一般按控制功率相等的原则计算接触器的工作电流，但在较低的工作电压下，工作电流不应超过同一接触器的约定发热电流；最高工作电压下，接触器的控制功率可能有所增加或减少，主要取决于其触头灭弧系统性能的好坏。

6. 5. 4 环境条件的影响

接触器安装在控制箱或防护外壳内时，由于散热条件较差，环境温度较高，应适当降容使用，某些中、小容量接触器，设计时考虑到组成保护式电磁起动器的需要，设计试制时，在温升方面已留有一定的余量，此时不必降低容量。

6. 6 使用

6. 6. 1 安装前

- (1) 检查产品的铭牌及线圈上的技术数据（如额定电压、电流等）是否符合实际使用要求。
- (2) 用手分合接触器的活动部分，要求产品动作灵活无卡住现象。
- (3) 使用前应将铁心极面上的防锈油擦净，以免油垢粘滞而造成接触器断电不释放。

6. 6. 2 安装与调整

- (1) 安装接线时，应注意勿使螺钉、垫圈等零件失落，以免落入接触器内部而造成卡住或短路现象。安装时，应将螺钉拧紧，以防震动松脱。
- (2) 检查接线正确无误后，应在主触头不带电的情况下，先使吸引线圈通电分合数次，检查产品动作是否可靠，然后才能投入使用。

6. 6. 3 使用

- (1) 定期用压缩空气吹扫接触器，清除上面的灰尘和脏物。

- (2) 定期检查产品各部件，要求可动部分不卡住，紧固件无松脱。

- (3) 触头表面应经常保持清洁，不允许涂油，当触头表面因电弧作用而形成金属小珠时，应及时铲除。当触头严重磨损后，超程应及时调整，当厚度只剩下 $1/3$ 时，应及时调换触头。银及银基合金触头表面在分断电弧时生成的黑色氧化膜接触电阻很低，不会造成接触不良现象，因此不必锉修。

- (4) 陶土灭弧罩性脆易碎，应避免碰撞，如有碎裂，应及时调换。

7 起动器

起动器是起动和停止电机所需的所有开关电器与适当的过载保护电器组合的电器。主要用于三相异步电动机的起动、停止、换向及过载保护。

7. 1 设计要点

- (1) 起动器的外壳防护等级应符合表 2. 2-65 和表 2. 2-66 规定。

表 2. 2-65 船用起动器的外壳防护等级

处 所	环 境 条 件	防护等级
干燥的居住处所	只有触及带电部分的危险	IP20
干燥的控制室		
控制室	滴水 and (或) 中等机械损伤危险	IP22
机炉舱 (花钢板以上)		
舵机舱		
冷藏机室 (氨装置室除外)		
应急机械室		
一般贮藏室	较大的水和 (或) 机械损伤危险	IP44
配膳室		
粮食库		
围蔽的燃油分离室		
围蔽的滑油分离室	喷水危险, 货物粉尘存在, 严重机械损伤、腐蚀性气体	IP55
压载泵舱		
厨房和洗衣间	大量浸水的	IP56
双层底中的轴隧或管道		
露天甲板		

表 2.2-66 舰用起动器的外壳防护型式

适用处所举例	外壳防护型式	定 义
一般均不采用	开启式	不配备壳型保护, 允许空气自由流通
干燥舱室, 空调舱室或类似场所	防护式	能防止直径大于 12mm 的固体异物进入壳内及能防止手指触及带电部件或转动部件
一般舱室或类似场所	防滴式	从正常工作位置倾斜到 45°, 水滴垂直落下时, 应能正常运行
主甲板以上有溅水的部位或类似场所	防溅式	以正常工作位置安装, 水直接溅落在外壳表面上时应能正常运行
无危险的, 但需要防尘、防蒸汽、防腐蚀性气体和水汽作用的舱室中	全封闭式	能防止壳内外空气流通, 但不能防止空气泄漏
主甲板或类似场所	淋密式	防止水从任何方向溅入外壳
主甲板和短期浸水的场所	水密式	外壳受喷水或浸水时, 水不进入壳内
深水作业的场所	潜水式和开启潜水式	当潜入到规定深度的水中时, 应正常运行
汽油库等舱室主甲板或类似场所	隔爆式	能承受内部爆炸性气体混合物的爆炸压力, 并能阻止内部爆炸向外壳周围爆炸性混合物传播

(2) 起动器具有耐湿热性能。起动器经 55℃ 二周期 (舰用为 60℃ 五周期) 交变湿热试验后, 其性能符合下列规定:

- 1) 不同极带电部件之间, 各电路带电部件与地之间绝缘电阻应不小于 2MΩ (舰用为 1MΩ)。
- 2) 动作值符合产品标准规定。
- 3) 外壳不应有变形和裂缝, 油漆层不应起泡和脱落。
- 4) 能承受试前的工频试验电压值的 85% 历时 1min, 无击穿和闪络。

(3) 起动器具有耐霉性能, 其外露于空气中的绝缘零部件经 28d 长霉试验后, 长霉面积不得超过规定的二级长霉 (舰用为不大于总面积的 30%)。

(4) 起动器具有耐盐雾性能, 其外露于空气中的金属零部件经 48h 试验后, 外观变化应符合规定。

(5) 起动器具有耐倾斜和摇摆性能。船用起动器从正常安装位置向前、后、左、右四个方向各倾斜 22.5°, 试验时间为各方向 15min; 从正常安装位置向前后、左右二个水平轴向成 22.5° 摇摆, 周期为 10s, 各 15min。舰用起动器从正常安装位置向任何方向各倾斜 30°, 摇摆 45°。

在倾斜和摇摆试验时, 起动器的动作值在规定值范围内, 其动作值误差符合产品标准规定。

(6) 起动器具有耐振动性能, 在振动试验时, 应无紧固件松动、机械损坏和误动作, 试验后其动作值误差应在产品标准规定范围内。

(7) 舰用起动器具有耐冲击性能, 在冲击试验时, 无机械损坏和误动作, 动作性能和电流整定值符合产品标准规定。

(8) 舰用起动器具有耐颠簸性能, 在颠簸试验时, 无机械损坏和误动作, 动作性能和电流整定值符合产品标准规定。

7.2 国内产品

国内目前的船用或舰用起动器主要产品有: MC3 系列

电磁起动器, JQL1 系列直流电动机电磁起动器, QC91、QC98、QC99、QC916、QXC2、QCC2、QCJ1-10、WQ92 系列交流电磁起动器, QCC1 系列全压单个式交流电动机电磁起动器, QCZ91、QCZC1 型全压组合式交流电动机电磁起动器, QX91、QX92A、QX920 系列星-三角起动器, QXC1 型星-三角起动器, QZ-400 型直流磁力起动器, QD920 系列交流电动机自耦变压器降压起动器等。

QC99 系列船用交流电磁起动器是 20 世纪 90 年代设计的产品, 用以控制异步电动机的起动、停止及正、反向运行, 也可实行手动、自动转换。

QC99 系列船用交流电磁起动器选用了 LC1-D 系列接触器、LR1-D 系列热继电器等元件。有断相及过载保护功能, 可逆线路中正、反向两接触器间具有联锁, 保证动作可靠。

QC99 系列船用交流电磁起动器的主要技术数据、外形尺寸及质量见表 2.2-67、表 2.2-68。

表 2.2-67 QC99 系列船用交流电磁起动器的主要技术数据

起动器容量等级	额定工作电流 (A)	额定控制功率 (kW)			热继电器整定范围 (A)	热继电器规格
		220V	380V	440V		
1	9	0.2	0.37	0.55	1.0~1.6	LR1-D09306
		0.37	0.75	1.1	1.6~2.5	LR1-D09307
		0.75	1.5	1.5	2.5~4.0	LR1-D09308
		1.1	2.2	2.2	4.0~6.0	LR1-D09310
		1.5	3	3.7	5.5~8.0	LR1-D09312
		2.2	4	4	7.0~10.0	LR1-D09314
2	16	3	5.5	5.5	10.0~13	LR1-D12316
		4	7.5	9	13~18	LR1-D16321
3	25	5.5	11	11	18~25	LR1-D25322
4	40	7.5	15	15	23~32	LR1-D40353
		10	18.5	22	30~40	LR1-D40355
5	3	11	22	25	38~50	LR1-D63357
		15	25	30	48~57	LR1-D63359
		18.5	30	37	57~66	LR1-D63361
6	80	22	37	45	63~80	LR1-D80563
7	120	30	55	60	95~125	LR1-F125
8	150	45	75	80	100~160	LR1-F160

表 2.2-68 QC99 系列船用交流电磁起动器外形尺寸及质量

起动器规格	外形尺寸 (mm)			质量 (kg)	
	长	宽	高	A 型	B 型
QC99-1	400	250	180	9	11
QC99-2				12	14
QC99-3	450	300	200	15	17
QC99-4	500	350	220	18	20
QC99-5	530	400	220	21	24
QC99-6	550	400	240	25	28
QC99-7	600	450	240	30	33
QC99-8				35	38

QZ-400 直流磁力起动器之供电电源为直流 220~320V, 由线路接触器、延时接触器等元件组装而成。控制方式为手

动或遥控，具有短路保护及抗无线电干扰功能，耐冲击振动。用于专供控制舰船舱室辅机 66-10 空气压缩机组的带有起动器组的 ZKY-10 直流电动机起动与停止。

起动器外壳为钢板结构，45°防滴式，外壳箱盖借助手柄锁紧，箱盖上装有按钮和电容器，外壳底部有四个安装脚，垂直安装在电机上。

QZ-400 直流磁力起动器的主要技术参数和外形尺寸见表 2.2-69。

表 2.2-69 QZ-400 直流磁力起动器的主要技术参数和外形尺寸

额定电压(V)	DC 320 (最大)	外形尺寸(mm)		
额定电流(A)	360(最大)	长	宽	高
工作制	连续	450	410	425
工作特性	在 175~320V 范围内可靠吸合			
	在 175~320V 范围内延时为 1.5~6s			
	释放电压大于 10V			

8 控制继电器

船用控制继电器品种繁多，应用范围宽广。下面介绍的控制继电器主要有热继电器、中间继电器、时间继电器、逆功率继电器、逆流继电器、液位继电器、过电流继电器。

8.1 船用热继电器

热继电器是通过电流时发热，使双金属片变形，产生位移，推动杠杆机构动作，驱动触头改变控制电路的状态，对电路的过载起保护作用。

8.1.1 JR99-300A 型船用热继电器

JR99-300A 型船用热继电器供交流三相异步电动机或线路的过载保护之用，其使用电压在 380V 以下，频率为 50Hz，与接触器组合成为电磁起动器。

该继电器的特点为：三极，电流调整范围大，能自动返回，有应急再扣装置，有温度补偿，耐振动、冲击，耐潮湿，耐高温，倾斜时影响小，起动性能好。

该继电器用于长期工作制和间断长期工作制。

该继电器在下列工作条件下能满意工作：

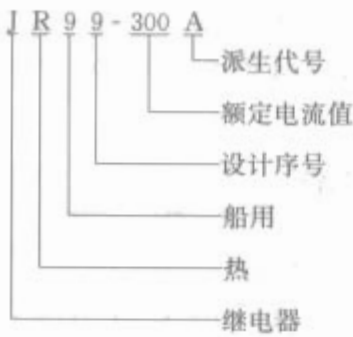
- (1) 周围环境温度为-25℃与+45℃之间。
- (2) 空气的相对湿度不大于 95%。
- (3) 安装面与垂直的倾斜小于 45°。
- (4) 能承受 I 级振动。
- (5) 能承受 I、II 级冲击。
- (6) 有凝露、油气、霉菌和盐雾的地方。

JR99-300A 型船用热继电器按额定电流分挡见表 2.2-70。

表 2.2-70 JR99-300A 热继电器额定电流分挡

额定电流 (A)	电流的调整范围 (A)
38	24~31~38
57	37~47~57
86	56~71~86
125	85~100~125
176	124~150~176
230	170~200~230
310	226~268~310

型号说明：



8.1.1.1 结构简介

该继电器由主双金属片、热元件、动杆、温度补偿双金属片、凸轮、弹簧、防冲触头、动触头、随动触头、静触头、应急再扣装置，以及酚醛玻璃纤维压制而成的底座等构成。

所有零件都装在底座上，通过受热元件间接加热而发生弯曲的主双金属片推动动杆，从而拨动了温度补偿双金属片，导致弹簧改变方向，使动触头与静触头分开，分断控制电路，使主电路断电。

该继电器的防冲击机构为半机械半电气的三触头式防冲击结构，结构简单，能承受大小不同的冲击力。

JR99-300A 型船用热继电器的结构原理如图 2.2-18 所示。

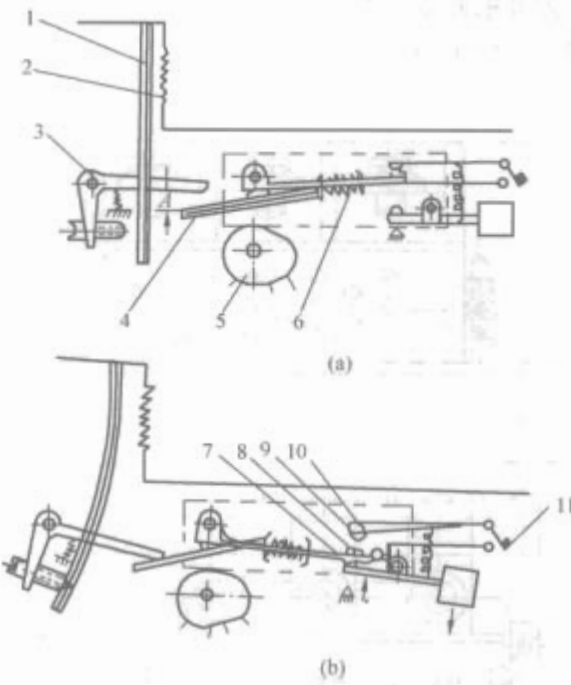


图 2.2-18 JR99-300A 型船用热继电器的结构原理图

(a) 正常时；(b) 动作时

- 1—主双金属片；2—热元件；3—动杆；4—温度补偿双金属片；5—凸轮；6—弹簧；7—防冲触头；8—动触头；9—随动触头；10—静触头；11—应急再扣

8.1.1.2 主要技术数据

JR99-300A 型船用热继电器的动作性能见表 2.2-71。

表 2.2-71 JR99-300A 型船用热继电器的动作性能

整定电流的倍数	动作时间	条件 (在周围环境温度为+45℃时)
1	不动作	三极同时直接通入整定电流温度达到稳定
1.1	1h 内不动作	三极同时先通入整定电流温度达到稳定后，接着三极同时通入 1.1 倍整定电流
1.35	20min 内动作	三极同时先通入整定电流温度达到稳定后，接着三极同时通入 1.35 倍整定电流
6	大于 15s 动作	三极同时直接通入 6 倍整定电流

JR99-300A 热继电器的动作特性曲线如图 2.2-19 所示。

继电器具有一对动断触头，是瞬时动作的，动作后能自动复位。触头的最大允许电流为 5A，当电压为交流 380V 时能分断 2.5A。

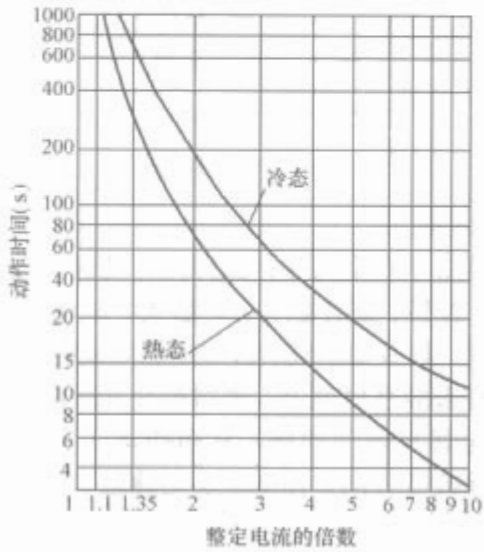
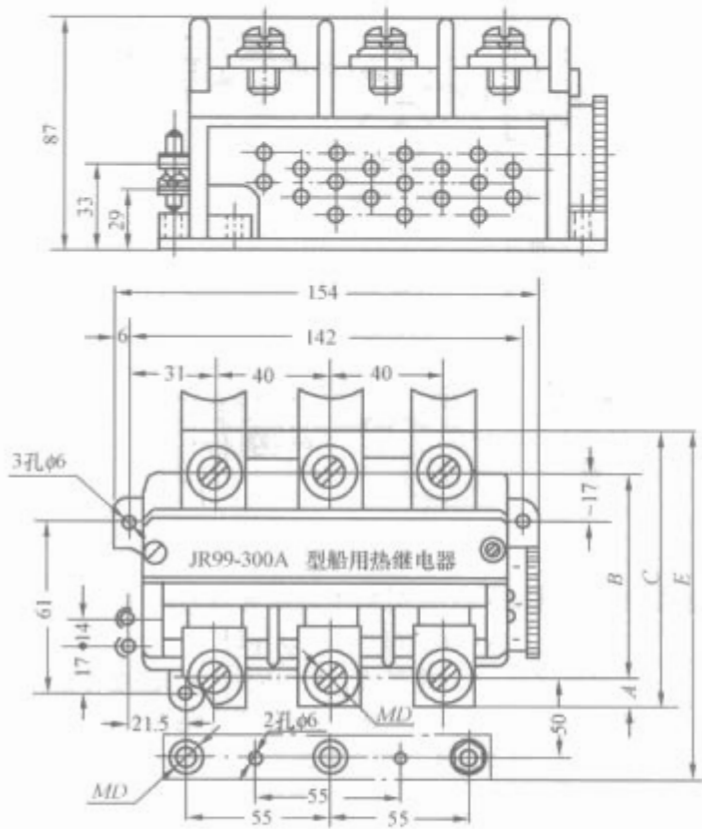


图 2.2-19 JR99-300A 型船用热继电器的动作特性曲线

8.1.1.3 外形和安装尺寸

继电器外形和安装尺寸如图 2.2-20 所示，继电器安装方向如图 2.2-21 所示。



额定电流 (A)	尺寸 (mm)				
	A	B	C	E	MD
38	7	74	91	—	M6
57	10	73	93	—	M8
86	10	73	93	—	M8
125	20	76	112	—	M10
176	20	76	112	—	M10
230	20	76	112	164	M10
310	22	86	125	171	M12

图 2.2-20 JR99-300A 型船用热继电器外形和安装尺寸

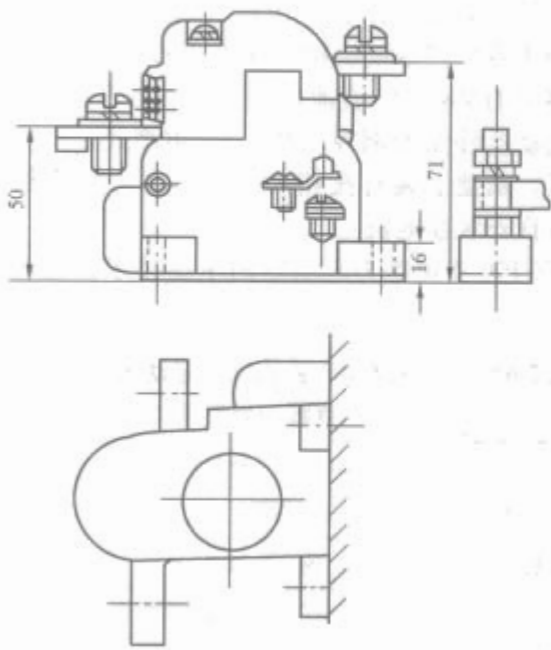


图 2.2-21 JR99-300A 型船用热继电器安装方向图

8.1.1.4 订货须知

订货时须注明：

- (1) 热继电器的型号、名称。
- (2) 热继电器的额定电流值。
- (3) 数量。

生产厂：沈阳低压开关厂。

8.1.2 JR915-40 型船用热继电器

JR915-40 型船用热继电器适用于船上交流 50Hz，电压至 380V，电流 45A 以下的长期工作及间继长期工作制的交流电动机，作过载保护之用，主要技术参数见表 2.2-72。

表 2.2-72 JR915-40 型船用热继电器主要技术参数

型 号	继电器 额定电流 (A)	热元件等级		
		热元件 编号	热元件额定电流 (A)	整定电流调节范围 (A)
JR 915-40	40	101	1.6	1~1.3~1.6
		102	2.4	1.5~2.0~2.4
		103	3.5	2.2~2.8~3.5
		104	5	3.2~4~5
		105	7.2	4.5~6~7.2
		106	11	6.8~9~11
		107	16	10~13~16
		108	24	15~20~24
		109	33	22~27.5~33
		110	45	30~37.5~45

该继电器适用于下列工作条件：

- (1) 环境空气温度不高于 +45℃，不低于 -25℃。
- (2) 空气的相对湿度不大于 95%。
- (3) 有 I 级冲击和 I 级振动。
- (4) 倾斜不超过 45°。
- (5) 有凝露、盐雾和霉菌。

型号说明：



8.1.2.1 结构

JR915-40 型船用热继电器的结构如图 2.2-22 所示。继电器的主要零部件安装在酚醛塑料压制而成的躯壳内。继电器的双金属片采用联合加热方法，且二极双金属片共用一个动作机构与触头系统。继电器通过转动电流调节凸轮来实现电流调节，利用温度补偿双金属片来达到温度补偿。该继电器设置有防冲击机构，保证触头在冲击情况下，能可靠地工作。

该继电器动作原理为：当线路过载时，主双金属片因过热弯曲推动拉板，并通过推杆，将动触头与静触头分开，使电路断电。当继电器动作后，自然冷却一定时候又可以自动复位，或手动复位，重新进行工作。

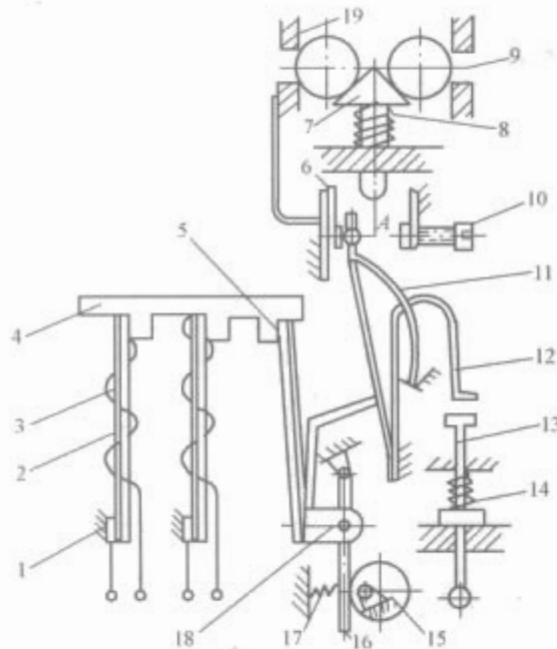


图 2.2-22 JR915-40 型船用热继电器的结构

1—躯壳；2—主双金属片；3—加热元件；4—拉板；5—补偿双金属片；6—静触头；7—跳子；8—弹簧；9—钢球；10—复位调节螺钉；11—动触头；12—复位弹簧；13—复位按钮；14—弹簧；15—凸轮；16—支持件；17—弹簧；18—推动；19—夹板

8.1.2.2 主要技术数据

继电器的保护特性在环境空气温度由 0~+55℃ 的范围变化时，其整定电流的变化不大于±3%时保护性能应符合表 2.2-71 的规定。而在环境空气温度由 0~-25℃ 的范围变化时，其整定电流的增加不大于 10%时，保护特性应符合表 2.2-73 的规定。

表 2.2-73 JR915 型热继电器保护特性

整定电流倍数	动作时间	备 注
1	长期不动作	从冷态开始
1.1	1h 内不动作	以整定电流加热至热稳定以后开始
1.35	小于 20min	
6	4~15s	从冷态开始

注 1. 保护特性系指继电器 2 极串联时的动作特性。
2. 继电器当只使用 1 极时，其整定的电流增加约 6%~10%。

JR915-40 型船用热继电器的安—秒保护特性曲线如图 2.2-23 所示（仅作参考）。

8.1.2.3 外形和安装尺寸

JR915-40 型船用热继电器外形和安装尺寸见图 2.2-24，安装时盖板位于上方。

8.1.2.4 订货须知

订货时须注明：

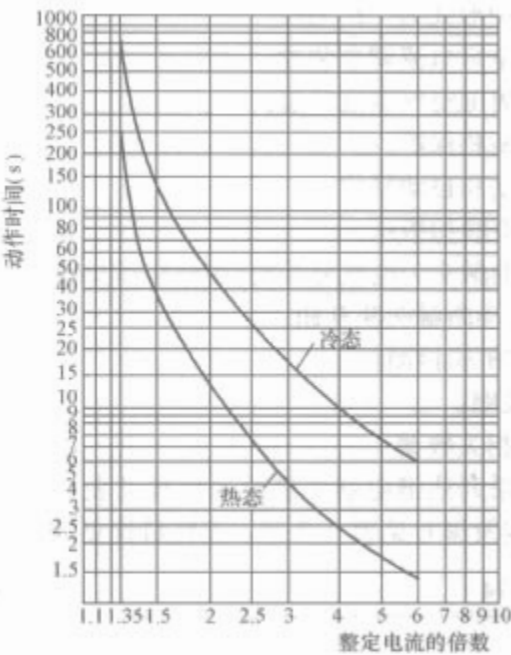


图 2.2-23 JR915-40 型船用热继电器安—秒保护特性曲线

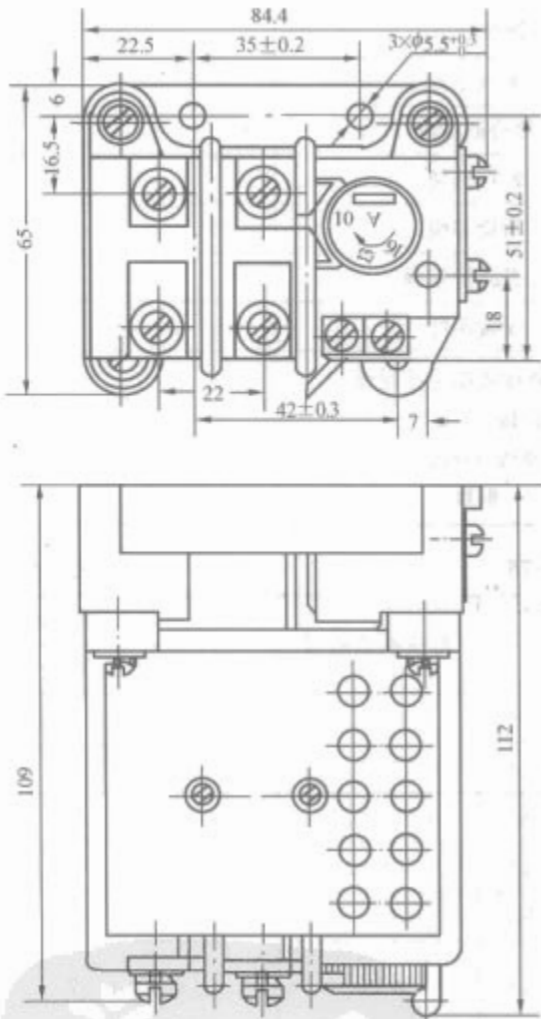


图 2.2-24 JR915-40 型船用热继电器外形和安装尺寸

- (1) 产品的型号、名称及数量。
- (2) 热元件的编号及整定电流调节范围。

例：JR 915-40 型热继电器，107 号热元件，整定电流 10~16A，10 台。

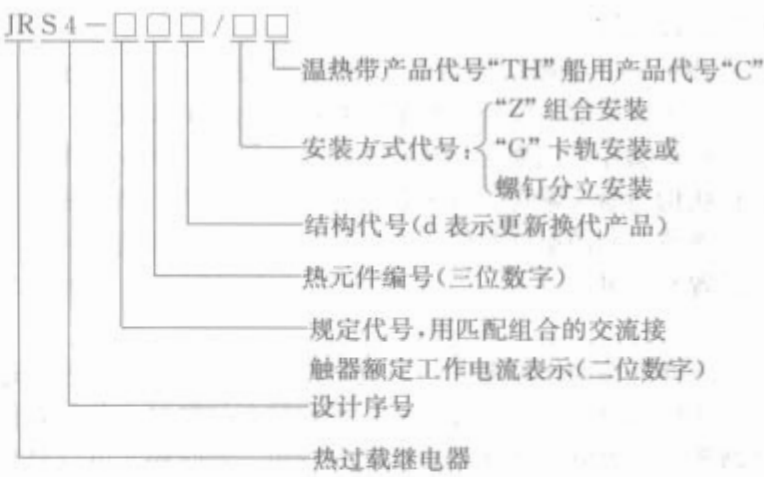
生产厂：沈阳低压开关厂。

8.1.3 JRS4-d 系列船用热过载继电器

JRS 4-d 系列船用热继电器经中国船级社 CCS 认证，用于交流 50Hz（或 60Hz），额定电压至 660V 的电路中，用作交流电动机的过载和断相保护。特点如下：

- 1) 双金属片式。
- 2) 三相。

- 3) 保护形式为“Ⅰ”型。
 - 4) 有整定电流调节装置。
 - 5) 有周围空气温度补偿。
 - 6) 带断相保护。
 - 7) 手动和自动复位。
 - 8) 具有脱扣指示。
 - 9) 辅助触头为电气分开的-动合和-动断触头。
 - 10) 有动断触头断开钮。
 - 11) 有机构检测钮。
- 型号说明：



8.1.3.1 相关数据

JRS4 系列热继电器主要技术参数见表 2.2-74，整定电流调节范围及编号见表 2.2-75，工作特性见表 2.2-76。

表 2.2-74 JRS4 系列热继电器主要技术参数

参 数	型 号	JRS4-09D-25d	JRS4-32d	JRS4-40D-95d
额定绝缘电压 U_i (V)		600		
周围空气 (℃)		-25~45		
海拔 (m)		≤220		
大气条件		周围空气为 40℃，大气相对湿度不超过 50%25℃时最大相对不超过 90%		
符合的标准		IEC947.4、GB14048.4、VDE0660、JEM1356		
贮存环境		温度-40℃~+55℃、相对湿度 (25℃时) 95%		
污染等级		3 级		
外壳防护等级		IP10		
安装条件		安装面与垂直面的倾斜度不大于 30°		
主回路接线端可接导线				
软线 (mm ²)		4	10	16
硬线 (mm ²)		6	16	25
根数		2	2	1

表 2.2-75 JRS4 热继电器整定电流调节范围及编号

型号	电流调整范围	控制功率 (AC3) (kW)					可插接的接触器	短路保护用熔断器 (A)	
		220V	380V	415V	440V	660V		aM	gG
JRS4-09301d	0.1~0.16	—	—	—	—	—	CJX4-09d~32d	0.25	2
JRS4-09302d	0.16~0.25	—	—	—	—	—	CJX4-09d~32d	0.5	2
JRS4-09303d	0.25~0.40	—	—	—	—	—	CJX4-09d~32d	1	2
JRS4-09304d	0.40~0.63	—	—	—	—	0.37	CJX4-09d~32d	1	2
JRS4-09305d	0.63~1	—	—	—	—	0.55	CJX4-09d~32d	2	4
JRS4-09306d	1~1.6	—	0.37	—	0.55	0.75 1.1	CJX4-09d~32d	2	4
JRS4-09307d	1.6~2.5	0.37	0.55 0.75	1.1	0.75 1.1	1.5	CJX4-09d~32d	4	6
JRS4-09308d	2.5~4	0.55 0.75	1.1 1.5	1.5	1.5	2.2 3	CJX4-09d~32d	6	10
JRS4-09310d	4~6	1.1	2.2	2.2	2.2	4	CJX4-09d~32d	8	16
JRS4-09312d	5.5~8	1.5	3	3 3.7	3 3.7	5.5	CJX4-09d~32d	12	20
JRS4-09314d	7~10	2.2	4	4	4	7.5	CJX4-09d~32d	12	20
JRS4-12316d	9~13	3	5.5	5.5	5.5	10	CJX4-12d~32d	16	25
JRS4-18321d	12~18	4	7.5	9	9	15	CJX4-19d~32d	20	35
JRS4-25322d	17~25	5.5	11	11	11	18.5	CJX4-25d~32d	25	50
JRS4-32353d	23~32	7.5	15	15	15	22	CJX4-32d	40	63

续表

型号	电流调整范围	控制功率 (AC3) (kW)					可插接的接触器	短路保护用熔断器 (A)	
		220V	380V	415V	440V	660V		aM	gG
JRS4-32355d	28~36	10	18.5	22	22	30	CJX4-32d	40	80
JRS4-40353d	23~32	7.5	15	15	15	22	CJX4-40d~95d	40	63
JRS4-40355d	30~40	10	18.5	22	22	30	CJX4-40d~95d	40	80
JRS4-50357d	37~50	11	22	25	25	37	CJX4-50d~95d	63	100
JRS4-65359d	48~65	15	25	30	30	45	CJX4-65d~95d	63	100
JRS4-65361d	55~70	18.5	30	37	37	55	CJX4-65d~32d	80	125
JRS4-80363d	63~80	22	37	45	45	75	CJX4-80d~32d	80	125
JRS4-95365d	80~93						CJX4-95d	100	160

表 2.2-76 JRS4 系列热继电器工作特性

动作特性	序号	整定电流倍数		动作时间	起始条件	周围空气温度 (℃)
		任意一相	另一相			
各相负载平衡时	1	1.00	0.90	>2h	冷态	20±5
	2	1.15	0	<2h	按序 1 试验后	
各相负载不平衡时	1	1.05		>2h	冷态	20±5
	2	1.20		<2h	按序 1 试验后	
	3	1.50		<4min	按序 1 试验后	
	4	7.20		>4s	冷态	
温度补偿性能	1	1.05		>2h	冷态	40±5
	2	1.20		<2h	按序 1 试验后	
	3	1.50		>2h	冷态	-5±2
	4	1.30		<2h	按序 3 试验后	

8.1.3.2 船用工作条件和注意事项

- (1) 周围空气温度：-25℃~+45℃。
 - (2) 大气条件：可有凝露、盐雾、油雾、霉菌、海上潮湿空气等存在。
 - (3) 倾斜：摇摆：各方向不超过 22.5°。
 - (4) 振动：频率为 2~13.2Hz，振幅为 ±1mm；频率 13.2~80Hz，加速度 ±7m/s。
 - (5) 电源电压和频率变化：稳态电压变化为额定值的 +6%~-10%，稳态频率变化为额定值的 ±5%。
 - (6) 安装面垂直面斜度不大于 5°，应按正常位置安装。
- 热继电器出厂时已调试合格，用户使用时不得随意打开盖板调动作机构，使用时注意以下几点：

- (1) 热继电器的正常工作位置应是躯壳上的盖板向上，处于水平位置。
- (2) 选用热继电器时应注意被保护电动机的型号、容量、工作场合、起动及负载情况，然后选择与被保护电动机额定电流值相适应的热继电器，并应调整电流调节装置，使热继电器的整定电流值与被保护的电动机的额定电流值相适应。
- (3) 热继电器出厂时复位按钮均调整在手动复位位置。
- (4) 热继电器与接触器组合安装时，螺钉要拧紧，否则会影响热继电器的动作特性、或者在受振动时可能脱落。

8.1.3.3 订货须知

- (1) 订货必须说明热继电器的产品型号、安装方式、电流调整范围和订货数量，湿热带型产品注明“TH”船用产品注明“C”。例：JRS 4-09305d/c 10 台
- (2) 分立安装座需要单独订货时，必须指明分立安装座的名称、代号和订货数量。例：分立安装座 5TD 574 103 10 只

8.1.4 3UA5、3UA6 系列热过载继电器

用途：热继电器用于交流 50Hz，主电路额定工作电压

1000V (3UA59 主电路额定电压 660V)；交流 60Hz，主电路额定工作电压至 440V，电流 0.1~630A 的电力系统中作三相交流异步电动机的过载与断相保护用。

3UA5、3UA6 系列热继电器是从德国西门子公司引进而生产的，其性能符合下列标准的有关规定：IEC 60292-1，VDE 0660 第 104 部分，ABS、GL、NV、RINa 和 PRS 等国家船级社的规范。

工作条件：周围空气温度不高于 +55℃ 和不低于 -25℃；海拔不大于 2000m；有盐雾、霉菌、油雾、振动、冲击（指船舶的正常工作营运时的振动与冲击）和有倾斜和摇摆不大于 22.5°，及在海上潮湿空气中正常工作。

型号含义：



8.1.4.1 结构简介

结构和功能：三相主双金属片公用一个动作机构，动作指示、电流调节等机构位于主双金属片的上部，呈立体式布置。3UA66、3UA68 热继电器带有电流互感器。

3UA5、3UA6 系列热继电器具有下述主要功能：

- 1) 过载和断相保护功能。
- 2) 温度补偿功能。
- 3) 有自由脱扣式的复位按钮。
- 4) 具有自动或手动复位。
- 5) 具有动作指示。
- 6) 有断开/试验按钮。

- 7) 具有一动合、一动断触头。
- 8) 有动作灵活性检查机构。
- 9) 具有独立、快速和插入（接触器）三种安装方式。
- 10) 热元件的整定电流，各规格之间重复交叉，便于选用。

- 11) 顶部具有接线与有关功能的指示标牌。
- 8.1.4.2 主要技术数据
- 1) 3UA5、3UA6 系列热继电器热元件的整定电流及配用的接触器和熔断器参数见表 2.2-77。

表 2.2-77 3UA5、3UA6 系列热继电器热元件整定电流及配用的接触器和熔断器参数

型号	热元件代号	热元件整定电流范围 (A)	配用接触器的型号 (在 $6I_n$ 时最长 启动时间为 10s), 电流 (A)								用于电动机起动器时熔断器	
											保护类型	熔体电流
											"a"① (A)	"C"② (A)
3UA58	3UA5800-2C	16~25	3TB48、3TF48			3TB47、3TF47			3TB46、3TF46		160	50
	3UA5800-2D	20~32									160	63
	3UA5800-2E	25~40									160	80
	3UA5800-2F	32~50									160	100
	3UA5800-2T	40~57	63			45		160	100			
	3UA5800-2P	50~63						160	100			
	3UA5800-2V	57~70						250	125			
	3UA5800-2U	63~80						250	125			
3UA59	3UA5900-0A	0.1~0.16	3TB48	3TB47	8TB46	3TB44	3TB43	3TB42	3TB41	3TB40	25	0.5
	3UA5900-0C	0.16~0.25									25	1
	3UA5900-0E	0.25~0.4									25	1.6
	3UA5900-0G	0.4~0.63									25	2
	3UA5900-0J	0.63~1	3TF48	3TF47	8TF46	3TF44	3TF43	3TF42	3TF41	3TF40	25	4
	3UA5900-0K	0.8~1.25									25	4
	3UA5900-1A	1~1.6									25	6
	3UA5900-1B	1.25~2									25	6
	3UA5900-1C	1.6~2.5	75	63	45	32	22	16	12	9	25	6
	3UA5900-1D	2~3.2									25	10
	3UA5900-1E	2.5~4									25	10
	3UA5900-1F	3.2~5									25	16
	3UA5900-1G	4~6.3	3TB48	3TB47	3TB46	3TB44	3TB43	3TB42	3TB41	3TB40	25	16
	3UA5900-1H	5~8									25	20
	3UA5900-1J	6.3~10									25	20
	3UA5900-1K	8~12.5									35	25
	3UA5900-2A	10~16	75	63	45	32	22	16			45	35
	3UA5900-2B	12.5~20	3TB48	3TB47	3TB46	3TB44	3TB43	3TB42、3TF42			63	50
	3UA5900-2C	16~25									63	50
	3UA5900-2D	20~32									80	63
	3UA5900-2E	25~40									125	80
	3UA5900-2M	32~45	75	63	45	32	22	3TB42、3TF42			160	100
	3UA5900-2T	40~57									160	100
	3UA5900-2P	50~63									160	100
3UA6200-2H	55~80	3TB52 3TF52									3TB50 3TF50 110	
3UA6200-2W	63~90				250	160						
3YA6200-2X	80~110				315	200						
3UA6200-3H	90~120				315	224						
3UA6200-3J	110~135	170									315	224
3UA6200-3K	120~150										355	250
3UA6200-3L	135~160										355	250
3UA6200-3M	150~180										355	250

续表

型号	热元件代号	热元件整定电流范围 (A)	配用接触器的型号 (在 $6I_n$ 时最长 启动时间为 10s), 电流 (A)			用于电动机起动器时熔断器	
						保护类型	熔体电流
						"a"① (A)	"C"② (A)
3UA66 3UA68	3UA6600-2K	80~125	3TB58 3TF58 630	3TB56 3TF56 400	3TB54 3TF54 250	500	250
	3UA6600-3B	125~100				500	315
	3UA6600-3C	160~250				500	315
	3UA6600-3D	200~320				500	315
	3UA6600-3E	250~400	3TB56 3TF58 630	3TB56、3TF56 400		800	500
	3UA6800-3F	320~500				800	500
	3UA6800-3G	400~630				1250	630

① 热继电器允许损坏。
② 热继电器的动作特性不应产生变化。

2) 3UA5、3UA6 系列热继电器的过载与断相动作性能见表 2.2-78。
3) 3UA5、3UA6 系列热继电器的动作特性见表 2.2-79。

4) 3UA5、3UA6 系列热继电器在 3~8 倍整定电流下, 典型产品的冷态动作时间见表 2.2-80。
5) 3UA5、3UA6 系列热继电器的主要技术参数见表 2.2-81。

表 2.2-78 3UA5、3UA6 系列热继电器的过载和断相动作性能

整定电流倍数	动作时间	起始条件	周围空气温度
1.05	2h 内不动	冷态	20℃
1.2	<2h	接序 1 试验后	
1.05	2h 内不动	冷态	20℃
1.5	<2min	接序 3 试验后	

表 2.2-79 3UA5、3UA6 系列热继电器的动作特性

整定电流倍数		动作时间	起始条件	周围空气温度
任意二相	第三相	2h 内不动	冷态	20℃
1.0	0.9			
1.15	0	<2h	接序 1 试验后	

表 2.2-80 3UA5、3UA6 系列热继电器的主要技术参数

型 号		3UA58	3UA59	3UA62	3UA66	3UA68	
动作时间等级		等级 10 ($6I_n$ 下动作时间 $\leq 10s$)					
断相保护 (通过差动板)		有	有	有	有	有	
可调的复位方式		有	有	有	有	有	
自由脱扣		有	有	有	有	有	
温度补偿 ($-25^{\circ}C\sim+55^{\circ}C$)		有	有	有	有	有	
动作指示		有	有	有	有	有	
断开按钮		有	有	有	有	有	
允许使用环境温度 ($^{\circ}C$)		$-25\sim+55$	$-25\sim+55$	$-25\sim+55$	$-25\sim+55$	$-25\sim+55$	
保护类型		IP/00 按 IEC 144 或 DIN40050					
耐振性 (g)		8	8	8	8	8	
主电路							
额定工作电流 I_n (A)		80	63	180	400	630	
额定绝缘电压 U_i (V)		1000	660	1000	1000	1000	
电流类型、频率范围		直流, 交流到 400Hz			交流 50~400Hz		
接线螺钉		M6	M5	M8	M8/M10	M10	
连接导线	单根或多根细线 (mm^2)	2.5~35	2.5~25	50~120	120~240	2×240	
	带接线头的细线 (mm^2)	1.5~25	1.5~16	35~95	—	—	
	汇流排 (mm^2)	—	—	20×30	20×5 2×30×5	2×30×5	
每一相热元件最大 消耗功率 (W/VA)		最小整定电流	2.6	2.3	5	4 (5)	6 (9)
		最大整定电流	4	4	7	10 (12)	15 (22)

表 2. 2-81 3UA5、3UA6 系列热继电器的主要技术参数

触头数量		1 动断+1 动合	1 动断+1 动合	1 动断+1 动合	1 动断+1 动合	1 动断+1 动合
接线螺钉		M3. 5	M3. 5	M3. 5	M3. 5	M3. 5
连接导线	单根或多根细线 (mm ²)	2× (1~2. 5)				
	带接线头的细线 (mm ²)	2× (0. 75~1. 5)				
额定绝缘电压 U _i (V)	1 动断 1 动合	380				
	1 个转换 (同电位)	660				
	1 动断	660				
动断触头约定发热电流 I _{th}		6A				

8. 1. 4. 3 外形尺寸

3UA5、3UA6 系列热继电器的外形尺寸见表 2. 2-82。

表 2. 2-82 3UA5、3UA6 系列热继电器的外形尺寸

型 号	尺寸 (mm)		
	长	宽	高
3UA58	87. 5	60	127
3UA59	87. 5	45	110
3UA62	104	100	146
3UA6600-2K (200A) 3UA6600-3B	150	160	220
3UA6600-3C (400A) 3UA6600-3D 3UA6600-3E	150	171	220
3UA68	150	186	220

8. 1. 4. 4 订货须知

订货时请指出产品的型号、名称和数量；热元件的代号及整定电流范围。例：3UA58 型热过载继电器，3UA5800-2D、20~32A，12 台。

生产厂：沈阳低压开关厂。

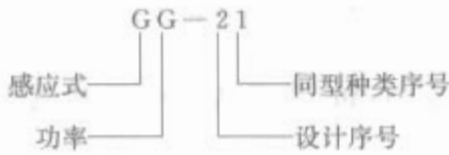
表 2. 2-83 GG-21 型逆功率继电器的动作特性

发电机额定功率 P _H (kW)	发电机额定电流 I _H = $\frac{P_H}{\sqrt{3}U_H\cos\varphi_c}$ (A)	电流互感器变比	发电机的额定电流时电流互感器电流 I ₂ (A)	各整定位置时继电器额定动作功率之百分比 (%)		
				1	2	3
				当 I _{cp} =8%×5 时	当 I _{cp} =12%×5 时	当 I _{cp} =16%×5 时
25	45. 2	10	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
40	72. 3	15	4. 81	8. 3	12. 5	16. 6
50	90. 4	20	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
75	135	30	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
100	181	40	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
150	271	60	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
200	362	80	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
225	407	120	3. 39	11. 8	17. 7	23. 6
250	451	120	3. 76	10. 6	15. 9	21. 2
300	542	120	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
400	724	150	4. 81	8. 3	12. 5	16. 6
500	903	200	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
600	1080	300	3. 62	11. 0	16. 5	22. 0
650	1170	300	3. 91	10. 2	15. 3	20. 4
750	1350	300	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7
1000	1810	400	4. 52	8. 85	13. 3	17. 7

8. 2 GG-21 型逆功率继电器

GG-21 型逆功率继电器是在出现逆功率时，断开交流发电机电网之用。

型号说明：



8. 2. 1 结构简介

继电器由导磁体、转动系统、接触系统、机构基座、外壳基座以及罩壳等构成。

逆功率继电器工作原理为感应式，该继电器的导磁体由上磁路系统与下磁路系统组成，电流线圈安装在上磁路系统中，电压线圈由两个线圈串联起来，安装在下磁路系统中。转动系统有压在轴上的铝盘，在铝盘上装有齿轮，与装有继电器动触头的齿轮相啮合。接触系统由动触头、固定在薄青铜片间的静触头组成。继电器导磁体、转动系统及接触系统安装在铝硅合金架子上，架子又装在铝硅合金底座上。

8. 2. 2 主要技术数据

GG-21 型逆功率继电器的动作特性见表 2. 2-83。

主要技术数据

- (1) 额定电压：100V、127V、230V，50Hz。
- (2) 额定电流：5A。
- (3) 最大灵敏角：30°~3°。
- (4) 动作功率：额定值的 64%、9.6%、12.8%。
- (5) 1.2 倍动作电流时的动作时间 2、3、5、7、9、12s。
- (6) 旋转力矩为

$M = KU_p I_p \cos(\varphi + \alpha)$

式中：K 为比例系数； U_p 为继电器电压； I_p 为继电器电流； φ 为相量 U_p 与 I_p 间相位移角； α 为对该继电器为 30°。

(7) 动作功率校准是在额定电压及电流超前电压相角 30° 时进行。

(8) 动作延时校准是在额定电压，1.2 倍动作电流及电流超前于电压 30° 相角时进行。

(9) 返回系数，即返回至初始位置的转动系统返回功率与动作功率之比不小于 0.6 它在动作时间整定在 2~5s 时检查。

(10) GG-21 型继电器采用标准电流互感器时 ($\cos\varphi_c = 0.8$) 实际动作功率发电机额定电压 U_H 为 400V (电压互感器 400/127V)。

8.2.3 外形及安装尺寸

GG-21 型逆功率继电器外形及安装尺寸如图 2.2-25 所示。

8.2.4 订货须知

订货时请注明所订购产品型号、名称、数量。
生产厂：上海继电器厂。

8.3 JN 系列逆流继电器

JN 系列逆流继电器用以防止直流电源产生反向电流，例如直流电机并联运用到公共网络中或给蓄电池充电时，电源的方向有变更时继电器就动作。

8.3.1 结构

该继电器用极化原理制成，它有一个电压线圈和一个电流线圈，当电流大于 800A 时，没有电流线圈，继电器直接安装在汇流排上。

该继电器按额定电压分为 10 种，电压线圈分别按其额定电压设计而定。

该继电器按额定电流分为 12 种，继电器的结构因额定电流的大小而有 3 种。

该继电器有一个动合触点或一个动断触点。

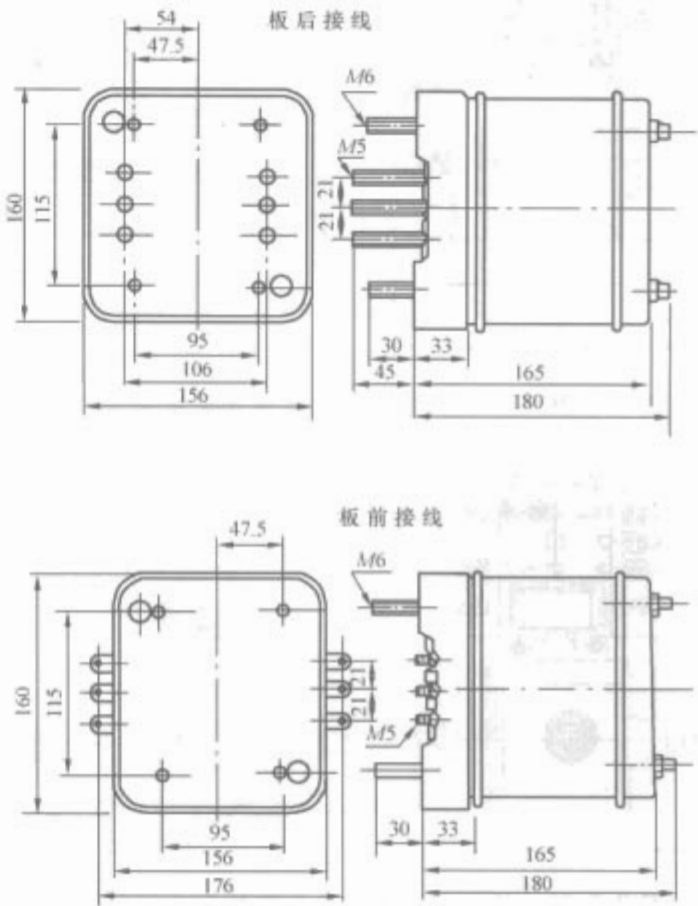


图 2.2-25 GG-21 型逆功率继电器外形及安装尺寸

安装时必须使继电器的轴处于水平位置，触点位于正上方。

8.3.2 主要技术数据

(1) 动作电流：继电器电流线圈中通入的反方向电流值不大于 15% 额定电流值时继电器应能动作。

(2) 返回情况：继电器电流线圈通入的反方向电流值为 50% 额定电流值时，断开电流回路动铁能可靠地返回。

(3) 耐受冲击电流：正方向直流值为两倍额定电流值时，断开和接通电流回路各一次，继电器不会误动作，也不会发生机械损坏等。

JN 型逆流继电器的规范见表 2.2-84，接线螺杆的直径见表 2.2-85。

表 2.2-84 JN 型逆流继电器的规范

型号	JN21		JN22		JN23	
接点型式	1 动合	1 动断	1 动合	1 动断	1 动合	1 动断
电流规范	6, 12, 25, 50, 100, 150, 200, 300		400, 600, 800		1600	
电压规范	6, 12, 24, 30, 36, 48, 50, 60, 110, 220		6, 12, 24, 30, 36, 48, 50, 60, 110, 220		6, 12, 24, 30, 36, 48, 50, 60, 110, 220	

表 2.2-85 TN 型逆流继电器接线螺杆的直径

电流 (A)	6, 12, 25, 50	100, 150, 200, 300	400, 600, 800
直径 (mm)	M6	M10	M12

8.3.3 外形及安装尺寸

JN-21 型逆流继电器用直径 M8 的螺杆紧固在屏板上，其外形及安装尺寸如图 2.2-26 所示。

JN-22 型逆流继电器连接在汇流排的截开处，电流线圈的出线头上附有安装零件，其外形及安装尺寸如图 2.2-27 所示。

JN-23 型逆流继电器没有电流线圈，直接安装在汇流排上，其外形及安装尺寸如图 2.2-28 所示，当汇流排的宽度大于 400mm 时，应将汇排按图 2.2-29 截割。

8.3.4 订货须知

订货时须注明型号、名称、数量。

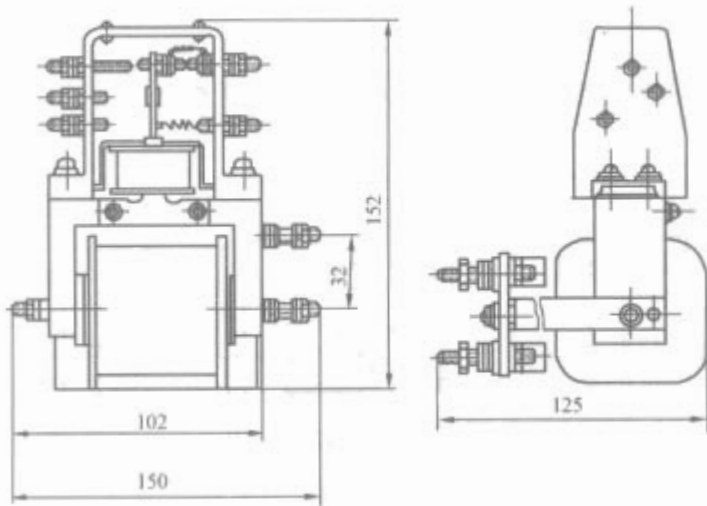


图 2.2-26 JN-21 型逆流继电器外形及安装尺寸

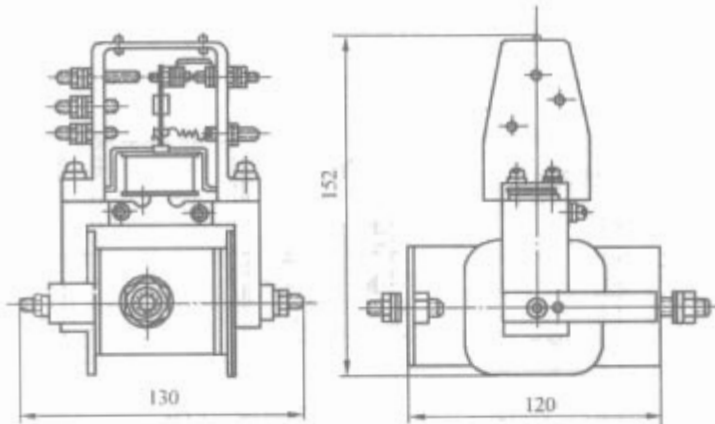


图 2.2-27 JN-22 型逆流继电器外形及安装尺寸

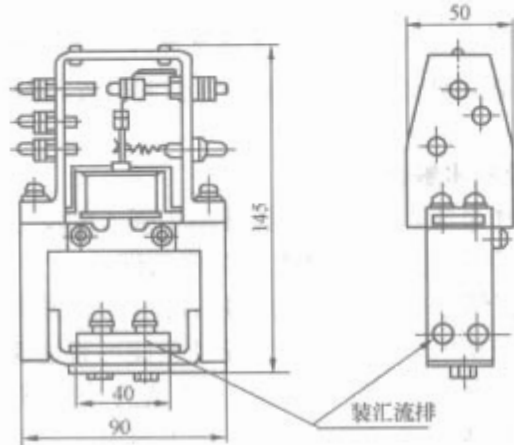


图 2.2-28 JN-23 型逆流继电器外形及安装尺寸

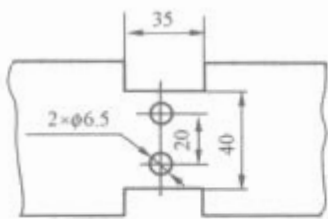


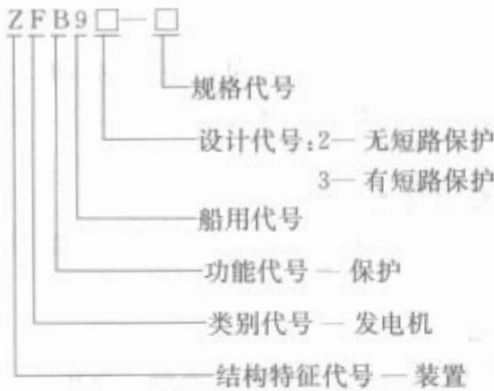
图 2.2-29 JN-23 型逆流继电器汇流排切割图 (汇流宽度大于 400mm)

生产厂：上海继电器厂。

8.4 ZFB92、ZFB93 (GENOP) 发电机过电流逆功率保护装置

ZFB92、ZFB93 型保护装置是 (电子元器件) 组合式的过电流逆功率保护装置。此种装置主要用于船舶三相交流发电机的过电流及逆功率保护, 也适用于其他类似的场所。

型号含义:



8.4.1 结构

过电流逆功率保护装置的所有部件装在一块带透明罩壳的聚碳酸酯外壳中, 防护等级为 IP53。装置适用于盘前安装, 而且也能安装在开关柜里面。电子器件、极限监视整定用的电位器和延时整定电位器及指示元件安装在印制板上, 并可通过透明罩壳看到。使用的元件只是工业级质量的。电位器是防潮的, 满足美国军用标准 (MIL-STD-202/106)。

8.4.2 主要技术数据

ZFB92、ZFB93 型发电机过电流逆功率保护装置主要技术数据见表 2.2-86。

表 2.2-86 ZFB92、ZFB93 型发电机过电流逆功率保护装置主要技术数据

运行电压 (V)	频率 (Hz)	功率消耗 (VA)		额定 电流 (A)	额定电流时功率 消耗 (每相) (VA)	整 定 值		
		连续	跳闸时间 短时			过电流 (三相)	短路 (GENOP23S 有)	逆功率
380 (或 100) ~ 440 (或 110)	50/60	3	10	1 或 5	2	50~130 I_n ①	100~300 I_n	1~20 I_n
跳闸继电器延时 (s)			输出触点载流能力		试验 电压	环境温度 (℃)		防护等级
			跳闸触点	信号触点		运行	贮存	
过电流	短路	逆功率	440V/5A AC	60V/0.5A AC②	2.5kV, 50Hz	-20~+60	-40~+70③	IP30 IP53
5~60	0.1~0.6	1~6						

① 对三个跳闸回路可分开调节。
② 也可考虑特殊要求。
③ 因为电解电容的原因, 应避免在 40℃ 以上长期贮存 (数年)。

8.4.3 外形尺寸

长×宽×高：259mm×212mm×168mm 板前安装。

8.4.4 订货须知

订货时须注明产品型号、名称、订货代号（见表 2.2-87）和订购数量。

表 2.2-87 产品规格及订货代号

型号	订货代号	额定电压(V)	额定电流(A)	延时(s)
ZFB92	7SP8011	380/440	1	1~6
ZFB92	7SP8012	380/440	5	1~6
ZFB93	7SP8013	380/440	1	1~6
ZFB93	7SP8014	380/440	5	1~6
ZFB93	7SP8015	100/110	1	1~6
ZFB93	7SP8016	100/110	5	1~6
ZFB92	7SP8021	100/110	1	1~6
ZFB92	7SP8022	100/110	5	1~6
ZFB92	7SP8023	380/440	1	2~12
ZFB92	7SP8024	380/440	5	2~12
ZFB92	7SP8025	100/110	1	2~12
ZFB92	7SP8026	100/110	5	2~12
ZFB93	7SP8031	380/440	1	2~12
ZFB93	7SP8032	380/440	5	2~12
ZFB93	7SP8033	100/110	1	2~12
ZFB93	7SP8034	100/110	5	2~12

生产厂：上海继电器有限公司。

9 主令电器

船用主令电器是用作接通和分断控制回路，以发布指令或作程序控制用的电器。其主要类型有控制按钮、行程开关、万能转换开关、主令控制器等。

9.1 控制按钮

控制按钮主要用于远距离控制接触器、电磁起动器、继电器的线圈及其他电气控制线路，也可用于电气联锁线路等，其类型和用途见表 2.2-88。

表 2.2-89 LA91 系列船用控制按钮主要技术数据

型 号	额定电压 (V)	额定电流 (A)	保护 型式	按钮数	触头数		外壳 材料	外形尺寸（长×宽×高） （mm×mm×mm）	质量 （kg）	生产厂
					动合	动断				
LA91-1H	500	15	防护式	1	1	1	钢板	87×71×85.5	0.5	上海电器厂
LA91-2H				2	2	2		132×71×85.5	0.83	
LA91-3H				3	3	3		182×71×85.5	1.1	
LA91-1S			防水式	1	1	1	铸铝合金	155×100×119	1.7	
LA91-2S				2	2	2		205×100×119	2.2	
LA91-3S				3	3	3		275×100×119	3.2	

9.1.1.3 订货须知

订货时请注明所需的型号、名称、外壳防护型式、标注文字和订购数量。

9.1.2 LA923 型船用控制按钮

LA923 型船用控制按钮适用于特种船舶上交流 50Hz、电压至 380V 和电流 220V 网络中的磁力起动器、接触器、继电器及自动断路器等线圈控制回路中，作为线路的接通与分断之用。

型号含义：

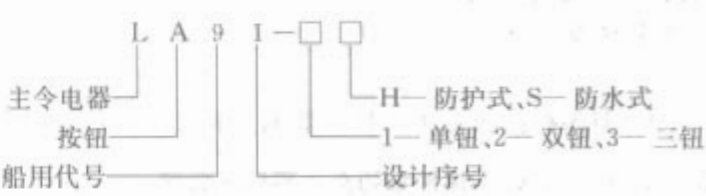
表 2.2-88 控制按钮的类型和用途

类 型	用 途
开启式按钮	一般安装于开关柜、控制柜、控制柜的面板上
保护式按钮	带有保护外壳，可防止内部的零件受机械损伤或操作者触及带电部分
防水式按钮	带有密封外壳，可防止雨水浸入，户外使用
防爆式按钮	适用于煤矿等有爆炸性气体和尘埃的环境使用
防腐式按钮	适用于有化工腐蚀性气体的环境使用
紧急式按钮	有红色大蘑菇头突出于按钮螺帽之外，供需紧急切断电源时使用
钥匙式按钮	只有用钥匙插入按钮才可操作，防止误动作
旋转式按钮	用手把旋转操作触头接通或分断电路
带灯按钮	按钮内装有指示灯，除具按钮功能外，尚可兼作指示灯
自持按钮	按钮内装有自持用电磁机构，一般为面板操作
双速按钮	触头机构的操作可以通过接触器对具有两个绕组的双速电机进行无间断的转换，保证电机及其他起重机械在转速变换时的机械性能

9.1.1 LA91 系列船用控制按钮

LA91 系列船用控制按钮适用于交直流工作电压不大于 500V、工作电流为 15A，主要用于远程控制电磁元件，如起动器、接触器、继电器等，或用于信号和电气联锁装置的线路中。

型号含义：



9.1.1.1 结构型式

LA91 系列控制按钮的结构为防护式和防水式两种，由外壳及按钮元件组成，防护式控制按钮的底座及罩壳用薄钢板冲制而成防水式控制按钮用铸铝合金浇注外壳，并用耐油橡皮作防水密封。

9.1.1.2 主要技术数据

LA91 系列船用控制按钮主要技术数据见表 2.2-89。

9.1.2.1 结构型式

LA923 型船用控制按钮的防护式为开启式，但当配用在不同的成套设备上时，可随设备本身的结构满足防尘及防滴的要求。本按钮由接触组和按钮头两部分组成。

9.1.2.2 主要技术数据

LA923 型船用控制按钮主要技术数据见表 2.2-90。

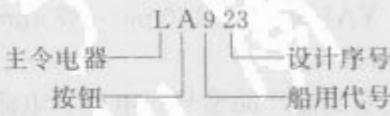


表 2.2-90 LA923 系列船用控制按钮技术数据

型号	额定电压 (V)		允许断开的电流值 (A)			按钮寿命数 (次)		外形尺寸 (长×宽×高)	质量 (kg)	备 注	生产厂
	交流	直流	交流 380V	直流 110V	直流 220V	机械	电气				
LA923	380	220	5	1	0.5	50 万	20 万	51mm×46mm×52.5mm	6	LA923 的规格为: 起动、停止、正向、反向	沈阳低压开关厂

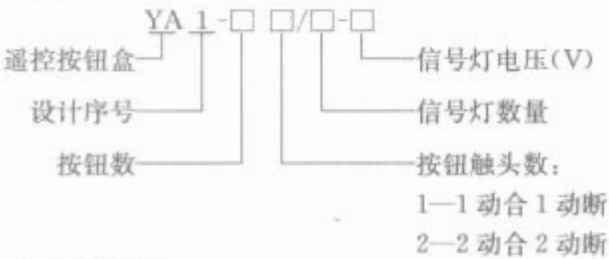
9.1.2.3 订货须知

订货时请注明产品型号、名称、规格及数量。

9.1.3 YAl 型遥控按钮盒

YAl 型遥控按钮盒供远距离控制各种电气设备的起动、停止和可逆运转之用。

型号含义:



9.1.3.1 结构型式

YAl 型遥控按钮盒采用新颖的 LAY3 系列按钮。YAl 型遥控按钮盒的外壳采用薄钢板折弯成型后电焊而成, 由壳体 and 盖两部分构成。按钮和指示灯安装在盒盖上, 盖与壳体间用螺钉固定, 并用橡胶垫密封。盒内装有接线端子排, 通过盒下部的填料函与外部电缆连接。

9.1.3.2 主要技术数据

额定绝缘电压: AC660V (50 或 60Hz); 约定发热电流: 10A。

YAl 型遥控按钮盒主要技术数据见表 2.2-91。

表 2.2-91 YAl 型遥控按钮盒主要技术数据

使用类别	额 定 值							生产厂
AC-11	额定工作电压 (V)	660	380	220	110	48	24	
	额定工作电压 (V)	1.5	2.5	4.5	6	6	8	
DC-11	额定工作电压 (V)	440	220	110	48	24	12	无锡航海电器厂
	额定工作电压 (V)	0.1	0.3	0.6	1.3	2.5	4	

机械寿命: 一般钮、蘑菇头钮 300 次, 带灯钮 100 万次, 旋钮、钥匙钮、自锁钮 10 万次。

电寿命: 交流 60 万次, 直流 30 万次; 旋钮、钥匙钮、自锁钮 10 万次。

防护等级: IP55。

外形尺寸: YAl-2□/1 100mm×240mm×150mm
YAl-3□/1 100mm×310mm×150mm
YAl-4□/2 160mm×375mm×150mm
YAl-6□/2 160mm×505mm×150mm
YAl-8□/2 160mm×375mm×150mm

9.1.3.3 订货须知

订货时须注明所需产品型号、电压、电流及所需台数。

9.1.4 LA926 系列船用按钮

LA926 系列船用按钮在交流 50Hz 或 60Hz, 电压至 440V; 直流电压到 440V 的电路中, 供军舰、民船之控制台、开关板、操作屏等电气电子设备上作控制开关。

按钮在下列环境条件下正常工作:

- (1) 温度不高于+55℃不低于-25℃。

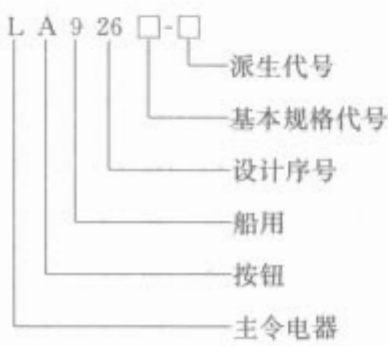
- (2) 相对湿度不大于 98%, 有凝露。

- (3) 有冲击和振动的场所。

- (4) 有盐雾、霉菌和油汽的地方。

- (5) 无爆炸危险的介质中, 且介质中无足以腐蚀和破坏绝缘的气体 and 导电尘埃。

型号说明:



注: 普通按钮无派生代号, J—防溅水, S—防强力喷水, D—带指示灯。

9.1.4.1 结构型式

LA926 系列船用按钮采用跳跃式桥式结构, 行程长, 断开快、有利于触头的接通和分断, 有很好的抗冲振性能。按钮的绝缘件主体材料具有滞燃、三防和优良的机械性能及电气性能。

该按钮具有体积小、质量轻、寿命长、使用可靠、通用性强等优点。为我国船用按钮小型化, 系列化、标准化创造了条件, 达到了国内先进水平, 是目前国内较理想的船用按钮。

9.1.4.2 主要技术数据

- (1) 按钮的额定发热电流为 5A。

- (2) 按钮的接通和断开能力在表 2.2-92 规定的条件, 不低于 20 次。其中通电时间交流不大于 0.2s, 直流不小于 4 倍的时间常数, 每次间隔为 5s, 试验后按钮能继续工作。

- (3) 按钮的机械寿命不少于 100 万次。

- (4) 按钮在表 2.2-92 规定的条件下, 电寿命不少于 20 万次。

LA926 系列船用按钮主要技术数据见表 2.2-93。

表 2.2-92 LA926 系列船用的控制按钮电寿命试验条件

额定电压 (V)	额定电流 (A)	接 通		分 断		操作频率 (次/h)	通电持续率 (%)
		电流 (A)	功率因数 cosφ	电流 (A)	功率因数 cosφ		
440	5	5	0.4	0.5	0.4	1200	40

表 2.2-93 LA926 系列船用按钮主要技术数据

电 压 (V)		接 通		通 断 能 力			
				电感负载			电阻负载
		电 流 (A)	功率因数 $\cos\varphi$	电流 (A)	功率 因数	时间 常数	
交 流	380×110%	50	0.4	5	0.4	—	5
	440×110%	30					
直 流	220×110%	4		0.5	—	0.05	1
	440×110%	2					0.5

9.1.4.3 订货须知

订货时须注明下列各项：产品名称、型号、规格、派生代号、钮色。

9.2 行程开关

9.2.1 LX914 系列行程开关

适用于交流 220V 及 50Hz、380V 以下的控制电路中作终点开关或作电传动作装置控制线路之用。

型号说明：

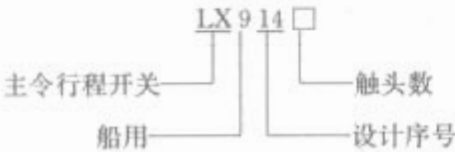


表 2.2-94 LX914 系列行程开关断开电流值

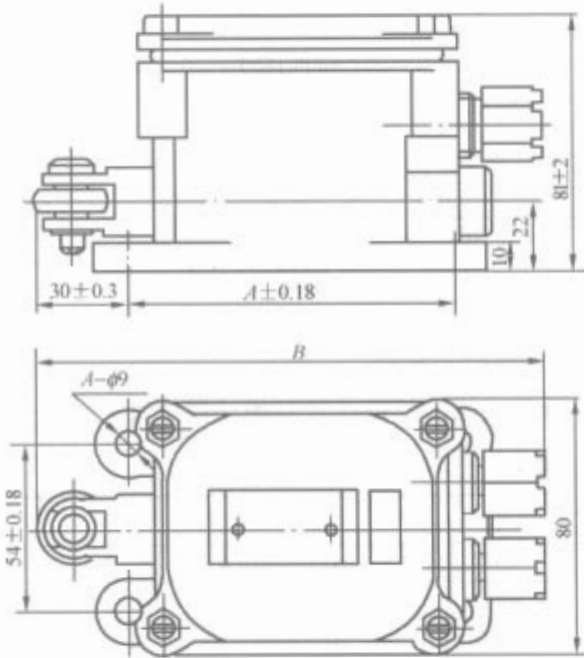
电流种类	电压 (V)	触杆运动速度 (m/s)	0.05	0.15	0.30	0.60
直流	24, 220	电感性电路 $L/R > 0.03$ 断开时电流强度 (A)	—	—	—	25
		电阻性电路断开时电流强度 (A)	1.5	2.5	3	6
			2	3	4	8
交流	380	电感性电路 $\cos\varphi < 0.4$ 或电阻性电路断开时电流强度 (A)	4	6	8	12

(3) 行程开关压下触杆所需的力为 44N(4.5kgf)，当触杆位移 (15 ± 1) mm 时作用于触杆上的力为 117.7N(12kgf)。

(4) 行程开关触头上的初压力为 2.5N (0.25kgf)，终压为 5.9N (0.6kgf)。

9.2.1.3 外形及安装尺寸

LX914 系列行程开关外形及安装尺寸如图 2.2-30 和图 2.2-31 所示。



型 号	A	B
LX914-01 I 式	107	182
LX914-01 I 式	107	182
LX914-01 I 式	100	235

图 2.2-30 LX914 系列行程开关外形 (I 式)

9.2.1.4 订货须知

订货时须注明：

- (1) 行程开关型号与名称，以及所需数量。
- (2) 额定电压。

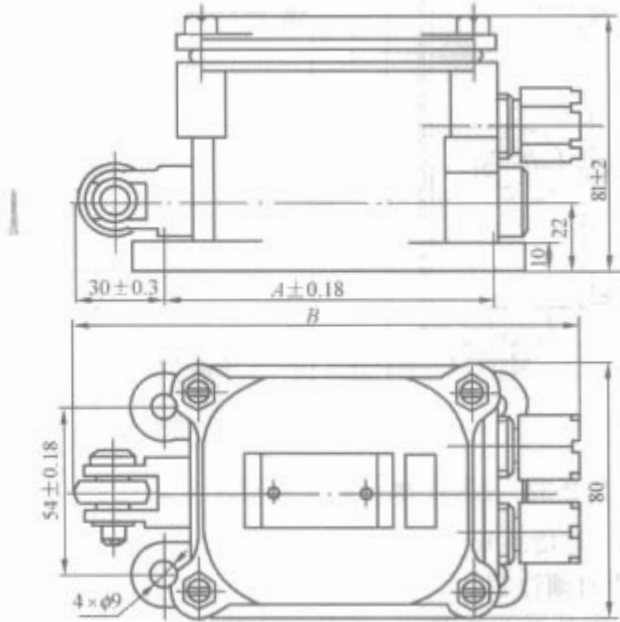
9.2.1.1 结构简介

LX914 系列行程开关由底座、盖、滚轮、触杆、反力弹簧、动触头、静触头等组成。动作原理为：外力作用在滚轮上，带动导杆将动断触头打开、动合触头闭合，外力消失后，依靠反力弹簧恢复到原来位置。

9.2.1.2 主要技术数据

(1) 行程开关在额定电压时允许断开电流强度值，应根据触杆运动速度和电路负载特性而定，其值符合表 2.2-94 规定。额定操作频率为每秒钟接通一次，接通时间 1s，连续操作 2min，行程开关仍可继续使用。

(2) 行程开关触杆的基本工作行程为 (15 ± 1) mm，而触杆的实际允许最大行程为 20mm。



型 号	A	B
LX914-01 II 式	107	182
LX914-01 II 式	107	182
LX914-01 II 式	160	235

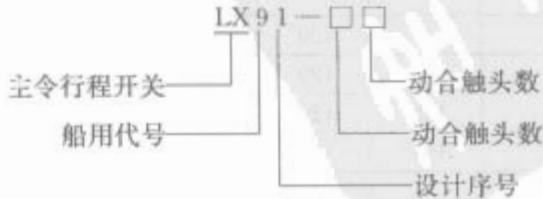
图 2.2-31 LX914 系列行程开关外形 (II 式)
生产厂：上海电器厂。

9.3 限位开关

9.3.1 LX91 系列船用限位开关

LX91 限位开关适用于交流 380V、直流 220V 的电网中，在控制线路中起变换运动机构运行速度、方向或行程的作用。

型号说明：



9.3.1.1 结构简介

LX91 限位开关主要由壳体、盖、动、静触头系统、滚

轮等组成，外壳防护型式为防滴式。

9.3.1.2 主要技术数据

LX91 型限位开关规格见表 2.2-95，基本参数见表 2.2-96。限位开关的推杆总行程不小于 9mm，触头超额行程不小于 2mm。

表 2.2-95 LX91 型限位开关规格		
型 号	触 头 数	
	动 合	动 断
LX91-03	0	3
LX91-30	3	0
LX91-12	1	2
LX91-21	2	1

表 2.2-96 LX91 型限位开关基本参数					
额定电压 (V)	允许持续电 流 (A)	操作频率 (次/h)	滚轮轴线与 壳体安装位置	质量 (kg)	备注
交流 380 直流 220	6	300	垂直与水平	0.9	触头为非 瞬时分断

9.3.1.3 外形及安装尺寸。

LX91 限位开关外形及安装尺寸如图 2.2-32 所示。

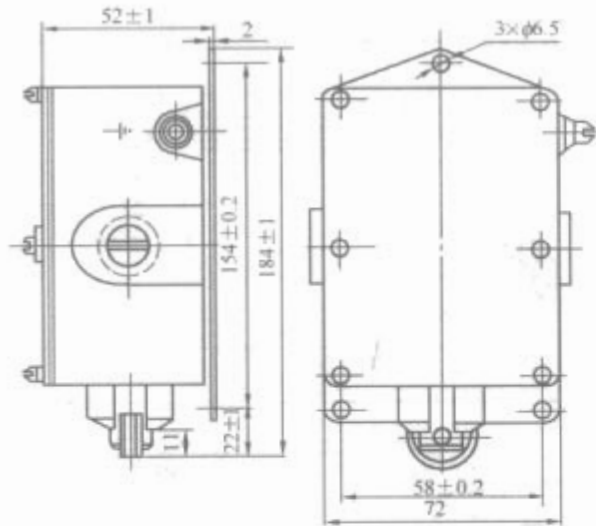


图 2.2-32 LX91 限位开关外形及安装尺寸

9.3.1.4 订货须知

- 订货时须注明：
- (1) 限位开关的型号、名称和台数。
 - (2) 限位开关的额定电压、电流。
 - (3) 备品备件。
- 生产厂：上海电器厂。

表 2.2-98 操作方式、特征代号与操动器位置关系													
操作方式	特征代号	操 动 器 位 置											
自复型	A						0°←	45°					
	B				45°		→0°←	45°					
定位型	C						0°	45°					
	D				45°		0°	45°					
	E				45°		0°	45°	90°				
	F			90°	45°		0°	45°	90°				
	G			90°	45°		0°	45°	90°	135°			
	H		135°	90°	45°		0°	45°	90°	135°			
	I		135°	90°	45°		0°	45°	90°	135°	180°		
	J		120°	90°	60°	30°	0°	30°	60°	90°	120°		
	K		120°	90°	60°	30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	
	L	150°	120°	90°	60°	30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	
	M	150°	120°	90°	60°	30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
	N					45°	45°						
	P					90°	0°	90°					
	R					90°	0°	90°	180°				

9.4 万能转换开关

9.4.1 H-LW98 系列舰（船）用万能转换开关

H-LW98 系列转换开关供安装在舰船上，适用于交流 50Hz、电压至 380V 及直流电压至 220V 的舰船电路中，用作控制电磁线圈的通、断，电气测量仪表、控制台、电动机的换向，变速及控制伺服电动机和交流、直流辅助电路等用途。

该系列转换开关在表 2.2-97 环境条件下能满意工作。

表 2.2-97 H-LW98 系列转换开关正常工作环境	
环境条件	额定数据
环境空气温度最高值	+50℃
环境空气温度最低值	-25℃
海上潮湿空气影响	有
盐雾影响	有
油雾影响	有
霉菌影响	有
倾斜	≤30°
摇摆	≤45°
颠簸	有
振动	有
冲击	有

型号及其含义如下：



9.4.1.1 主要技术数据

(1) 操作方法、特征代号与操动器位置关系见表 2.2-98。

续表

操作方式	特征代号	操 动 器 位 置											
特殊定位型	S					45°	0°	45°					
	T					45°	0°	45°					
定位-自复型	X					90°	0°	45°					
	Y				135°	90°	0°	45°					

(2) 转换开关的绝缘电阻, (冷态) 应大于 100MΩ。

(3) 电寿命。转换开关从一个断开的电路位置至一个相邻的闭合电路位置, 并回到这断开的电路位置的开关轴的运动称为一次操作循环。转换开关电寿命操作循环次数应符合表 2. 2-100 的规定。电寿命试验回路参数见表 2. 2-99。

(4) 机械寿命。转换开关的机械寿命以无电负载的操作

循环次数表示, 其值应符合表 2. 2-100 的规定, 开关轴通过所有开关位置的一次完整的旋转即为一次操作。

(5) 接通和分断能力。正常条件下的接通和分断能力见表 2. 2-101, 非正常条件下的接通和分断能力见表 2. 2-102。

9. 4. 1. 2 外形尺寸及安装尺寸

外形尺寸及安装尺寸如图 2. 2-33 所示。

表 2. 2-99 电寿命试验回路参数

电流种类	使用类别	接 通				分 断				每小时 操作次数	通电时间
		U/U_e	I/I_e	$\cos\varphi$	$T_{0.95}$ (ms)	U/U_e	I/I_e	$\cos\varphi$	$T_{0.95}$ (ms)		
AC	AC-15	1	10	0. 7		1	1	0. 4		300	$50\% > \frac{t}{t_0} > 10\%$
DC	DC-13	1	1		6P	1	1		6P		

表 2. 2-100 操作循环次数

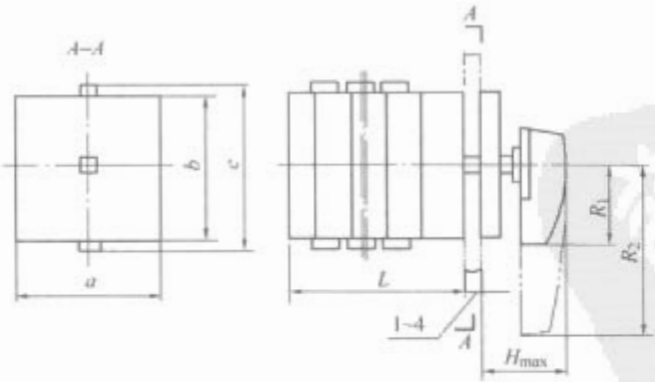
电寿命 (次)	机械寿命 (次)	总次数 (次)
40 000	50 000	45 000

表 2. 2-101 正常条件下的接通和分断能力

使用类别	接 通			分 断			操 作 参 数		
	U/U_e	I/I_e	$\cos\varphi$ 或 $T_{0.95}$	U/U_e	I/I_e	$\cos\varphi$ 或 $T_{0.95}$	操作循环次数	每分钟操作次数	通电时间 (s)
AC-15	1	10	0. 3	1	1	0. 3	6050	6	$\geq 0. 05$
DC-15	1	1	6P	1	1	6P	6050	6	$\geq 0. 05$

表 2. 2-102 非正常条件下的接通和分断能力条件

使用类别	接 通			分 断			操 作 参 数		
	U/U_e	I/I_e	$\cos\varphi$ 或 $T_{0.95}$	U/U_e	I/I_e	$\cos\varphi$ 或 $T_{0.95}$	操作循环次数	每分钟操作次数	通电时间 (s)
AC-15	1. 1	10	0. 3	1. 1	10	0. 3	10	6	$\geq 0. 05$
DC-15	1. 1	1. 1	6P	1. 1	1. 1	6P	10	6	$\geq 0. 05$



开关外形尺寸图 (mm)

操作方式	型号	L	a	b	c	H_{max}	R_1	R_2	面板尺寸
定位型	H-LW98-16	$34.5+13n$	44	44	51	32	24	50	48×60×9
复位型	H-LW98-16	$48+13n$							48×48×9
定位-复位形	H-LW98-16								

图 2. 2-33 万能转换开关外形及安装尺寸
注 n 为接触系统节数。

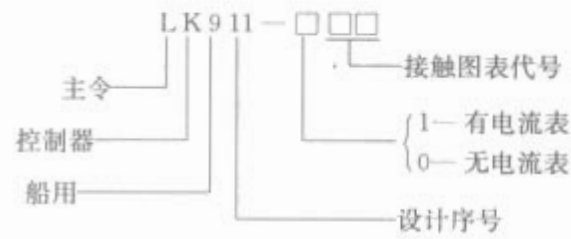
9.4.1.3 订货须知

有关订货需求请与上海均友科技有限公司联系 [上海电器科学研究所 (集团) 有限公司军工产品事业部]。

9.5 船用主令控制器

9.5.1 LK911、LK911A 系列

型号说明:



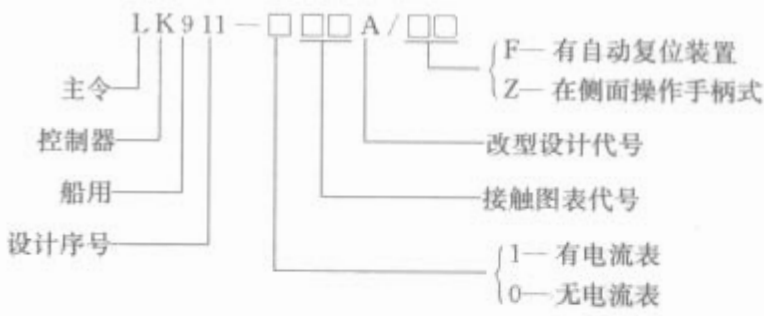
LK911、LK911A 系列船用主令控制器, 适用于直流电压 220V、交流电压 380V, LK911 系列长期工作电流为 20A, LK911A 系列为 10A, 供船舶甲板机械电控设备或磁力站作手动操作远程控制电动机的起动、运转、调速、逆转用。

型号说明:

表 2.2-103

LK911 系列船用主令控制器技术参数

型号	额定电压 (V)		额定电流 (A)	每小时允许 接通次数 (次/h)	工作位置		电路数	有否 电流表	备注
	交流	直流			“上升” “收绳”	“下降” “放绳”			
LK911-001A	380 以下	220	LK911 系列为 20A	600	5	5	8	无	
LK911-001					5	5	8	有	
LK911-101A					5	5	8	有	
LK911-101									
LK911-002A					5	5	11	无	
LK911-002									
LK911-002					3	3	11	有	
LK911-008/F					3	3	10	无	
LK911-008					3	3	10	无	
LK911-108					3	3	10	有	
LK911-011A/F			3		3	9	无		
LK911-012A			4		4	8	无		
LK911-016A/F			2		2	8	无		
LK911-016			2		2	8	无		
LK911-116			2		2	8	有		
LK911-010A			3		3	7	无		
LK911-110A			3		3	7	无		
LK911-027			3		3	7	无		
LK911-127			3		3	7	有		
LK911-116A									
LK911-126			2		2	6	有		
LK911-026			2		2	6	无		
LK911-114A			3		3	7	无		
LK911-124			3		3	7	无		
LK911-014A									
LK911-024			2		2	6	无		
LK911-109A			2		2	6	无		
LK911-009A			3		3	6	有		
LK911-007			3		3				
LK911-107A									
LK911-107			3		3	7	无		
LK911-025			3		3	7	有		
LK911-125			2		2	6	无		
LK911-023			6		6	2	有		
LK911-123			5		5	12	无		
LK911-013A			3		3	12	有		
LK911-118A									



该系列主令控制器的外壳为铝硅合金铸成的防水式结构, 具有作总电源开关用的组合开关, 作应急用的控制按钮, LK911A 可装广角度的电流表。

电缆通过焊接在船舶甲板上的穿线管引入控制器内部, 由于使用上的要求, 操作手柄可装在右边或左边。

控制接触器的接触系统由定位装置、接触元件及凸轮块组成, 定位装置包括滚轮和棘轮, 元件的数量可按电路数而增减, 触头的开闭由凸轮块执行, 凸轮块为可调式。

LK911A 系列主令控制器为改进型产品, 可带装自动复位装置, 操作手柄能在任何工作位置自动复“零”。

9.5.1.1 主要技术参数

LK911 系列船用主令控制器技术参数见表 2.2-103。

续表

型号	额定电压 (V)		额定电流 (A)	每小时允许 接通次数 (次/h)	工作位置		电路数	有否 电流表	备注
	交流	直流			“上升” “收缆”	“下降” “放缆”			
LK911-137	380 以下	220	LK911 系列为 20A LK911A 系列为 10A	600			12	无	有自复
LK911-037					3	3	6	有	
LK911-104					3	3	6	有	
LK911-004					3	3	6	有	
LK911-104A					3	3	6	有	
LK911-004A					3	3	6	有	
LK911-103A					2	2	5	有	
LK911-103									
LK911-003A					2	2	5	无	
LK911-003									
LK911-106A					2	2	5	有	
LK911-106									
LK911-006					2	2	5	无	
LK911-005AF					3	3	6	无	
LK911-005					3	3	6	无	
LK911-105					3	3	6	有	
LK911-015A					3	3	9	无	
LK911-029									
LK911-129					3	3	9	有	

9.5.1.2 外形及安装尺寸

LK911、LK911A 系列主令控制器外形及安装尺寸如图 2.2-34、图 2.2-35 所示。

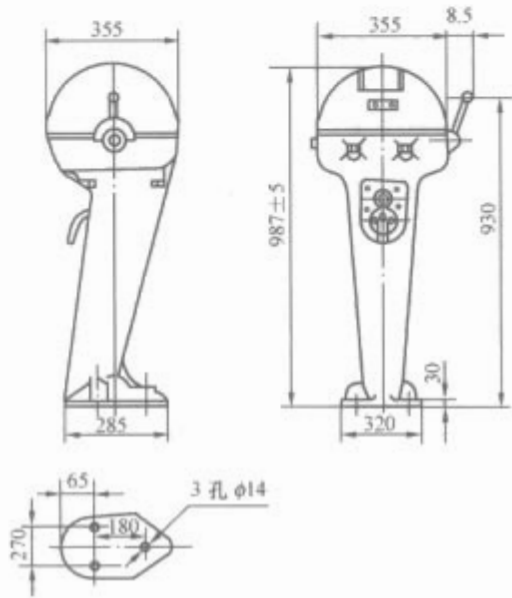


图 2.2-34 LK911 系列主令控制器外形及安装尺寸

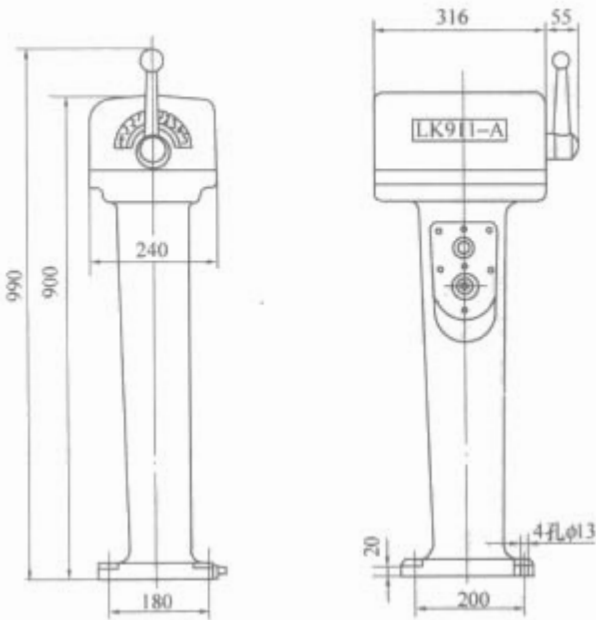


图 2.2-35 LK911A 系列主令控制器外形及安装尺寸

9.5.1.3 订货须知

订货时须注明控制器的型号及名称，线路的额定电压及额定电流（一次线路）。

生产厂：生海电器厂、山东省乐陵电器厂、广州南洋电器厂。

9.5.2 LKH1 型船用主令控制器

LKH1 型船用主令控制器，适用于交流 50Hz、380V 或 60Hz、440V 的船舶甲板电力传动系统，供反复短时间切换控制线路之用。

9.5.2.1 工作条件

周围环境空气温度不高于+45℃和不低于-25℃；周围空气的相对湿度不大于 95%；与垂直面的倾斜度为各方向 22.5°；能耐受船舶正常营运所产生的振动和冲击；能耐受盐雾、油雾、霉菌和海上潮湿空气的侵蚀；在无爆炸危险的介质中。

9.5.2.2 结构特征

控制器的外壳为防水式铁质（或铸铝）结构。铁质控制器采用钢板弯边并焊接而成，防护等级为 IP56。

控制器由 3LB3 型转换开关、HZ910 型组合开关、按钮、指示灯及电流表等组成，除电流表安装在控制器的顶部外，其余元件均安装在前侧面的盖板上，盖板与壳体间用橡胶垫密封。

9.5.2.3 型号含义



9.5.2.4 技术数据

LKH1 型船用主令控制器主要技术参数见表 2.2-104，基本类型见表 2.2-105，接触图表见表 2.2-106～表 2.2-111。

表 2. 2-104 LKH1 型船用主令控制器技术参数

额定绝缘电压	额定工作电流	直流额定工作电流	操作频率	机械寿命	电气寿命
650V	(AC: 380V) 10A	(220V) 0.6A	500 次/h	3×10 ⁶ 次	3×10 ⁵ 次

表 2. 2-105 LKH1 型船用主令控制器基本类型

型号	工作位置数		电路数	接触图表	配套控制箱
	上升	下降			
	起锚	抛锚			
LKH-101, 001	2	2	6	表 2. 2-106	双速锚机控制箱
LKH-102, 002	2	2	6	表 2. 2-107	双速锚机控制箱
LKH-103, 003	3	3	7	表 2. 2-108	三速锚机控制箱
LKH-104, 004	3	3	7	表 2. 2-109	三速锚机控制箱
LKH-005/F	2	2	8	表 2. 2-110	双速货机控制箱
LKH-006/F33			11	表 2. 2-111	三速货机控制箱

表 2. 2-106 接触图表一

抛头	起锚		0	抛锚	
	2	1		1	2
LK1			×		
LK2				×	×
LK3	×	×			
LK4		×		×	
LK5	×				
LK6	×	×		×	×

表 2. 2-107 接触图表二

抛头	上升		0	下降	
	2	1		1	2
LK1			×		
LK2	×	×			
LK3				×	×
LK4		×		×	
LK5	×				×
LK6	×	×		×	×

表 2. 2-108 接触图表三

抛头	上升			0	下降		
	3	2	1		1	2	3
LK1				×			
LK2	×	×	×				
LK3					×	×	×
LK4			×		×		
LK5	×	×				×	×
LK6	×						×
LK7	×	×	×		×	×	×

表 2. 2-109 接触图表四

抛头	起锚			0	抛锚		
	3	2	1		1	2	3
LK1				×			
LK2					×	×	×
LK3	×	×	×				

续表

抛头	起锚			0	抛锚		
	3	2	1		1	2	3
LK4			×		×		
LK5	×	×				×	×
LK6	×						×
LK7	×	×	×		×	×	×

表 2. 2-110 接触图表五

抛头	上升		0	下降	
	2	1		1	2
LK1			×		
LK2	×	×			
LK3				×	×
LK4	×	×			
LK5				×	×
LK6	×				×
LK7	×	×			
LK8				×	×

表 2. 2-111 接触图表六

抛头	上升			0	下降		
	3	2	1		1	2	3
LK1				×			
LK2	×	×	×				
LK3					×	×	×
LK4	×	×	×				
LK5					×	×	×
LK6	×	×				×	×
LK7	×	×					
LK8						×	×
LK9	×						×
LK10	×	×	×				
LK11					×	×	×

外形尺寸(长×宽×高): 无电流表为 370mm×370mm×1000mm, 有电流表为 370mm×370mm×1080mm。

生产厂: 无锡市航海电器厂。

10 电阻器

电阻器是用以改变回路中电阻值或变电能的热能的电器, 其结构类型有:

- (1) 铸铁电阻器。
- (2) 板形电阻器。
- (3) 铁铬铝合金电阻器。
- (4) 管形电阻器。

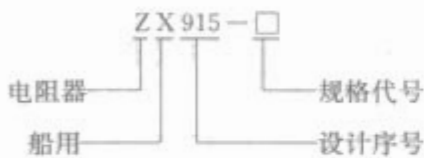
其中前三种类型电阻器适用于交流 50Hz、电压 660V 及以下、直流电压 440V 及以下的电路中, 供电动机启动、调速、制动和放电等用。管形电阻器适用于电压 500V 及以下的低压电器设备中, 供降低电压电流用。

10.1 Z X915 系列船用电阻器

Z X915 系列船用电阻器适用于交流 50Hz、电压至

500V 及直流电压至 440V 线路, 供电动机起动、制动、调速等用。

型号说明:



10.1.1 结构简介

Z X915 系列船用电阻器结构如图 2.2-36 所示。电阻元件由铁铬铝合金带、支持件、绝缘子等构成(或者管形电阻), 电阻元件的两端固定在支撑件上, 支撑件的两端套有绝缘子, 电阻元件之间由联结板联结, 电流引出端通过接线板上的接线头引出, 外壳由便于通风的百叶窗和侧板及盖组成, 使该电阻器构成防溅式, 使用时由支架固定移动时, 通过吊环螺钉将电阻器吊起。

10.1.2 主要技术数据

Z X915 系列船用电阻器主要技术数据见表 2.2-112。

Z X915 系列电阻器电阻元件主要技术数据见表 2.2-113。

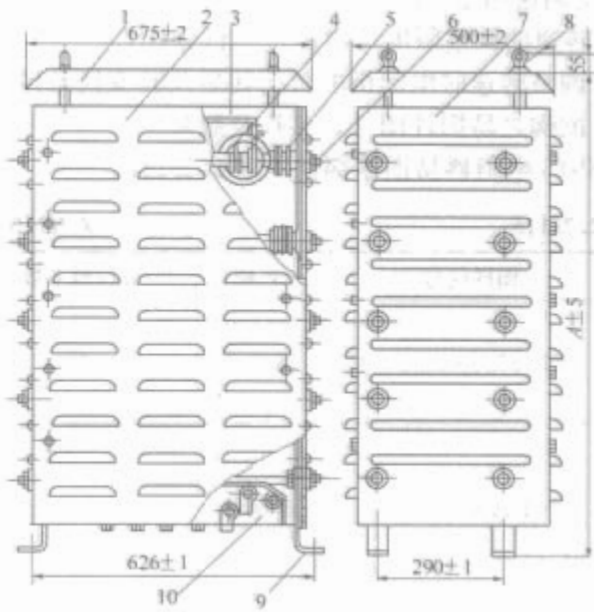


图 2.2-36 Z X915 系列电阻器结构图
1—盖; 2—百叶窗; 3—连接板; 4—电阻元件; 5—绝缘子; 6—支撑架; 7—侧板; 8—吊环螺钉; 9—支架; 10—接线板

表 2.2-112 Z X915 系列船用电阻器主要技术数据

型 号	电 阻 元 件			引出端 最多数	电阻范围 (Ω)	最大允许功率				质量 (kg)
	型号	材料	最多 数量			持续	$j_C=35\%$	3min	1min	
Z X915-1	ZY	铁铬 铝合金	5	13	0.016~7.75	3.4	10.5	7.5	20	45
Z X915-2			10		0.008~15.5	6.5	20.5	15.5	40	70
Z X915-3			15		0.005 3~24.0	8.5	27.5	23	60	95
Z X915-4			20		0.004~31.0	10.3	32.5	30	80	120
Z X915	ZB2	康铜	20							

表 2.2-113 Z X915 系列电阻器电阻元件主要技术数据

型号电阻		截面	匝数	外径	控制方式	允许电流	瓷件齿数	相当于 ZX1 系列电阻器编号
ZY-0.08	0.08	1.6×15	11	100	双股分绕	107	8	20
ZY-0.112	0.112	1.6×15	15	100	双股分绕	91	11	28
ZY-0.16	0.16	1.6×10	14	90	双股分绕	76	10	40
ZY-0.24	0.24	1.6×10	15	90	双股分绕	64	11	55
ZY-0.32	0.32	1.6×15	21	100	单股绕	54	8	80
ZY-0.42	0.42	1.1×10	28	90	双股分绕	46	10	110
ZY-0.6	0.6	0.8×8	23	90	双股分绕	39	8	75
ZY-0.84	0.84	0.8×10	21	90	单股绕	33	8	105
ZY-1.12	1.12	0.8×6	17	82	单股绕	29	8	140
ZY-1.6	1.6	0.8×6	23	82	单股绕	24	8	200
ZY-2.2	2.2	0.8×6	32	82	单股绕	20	11	280

10.1.3 外形及安装尺寸

ZX915 系列船用电阻器外形尺寸中 A 的尺寸见表 2.2-114。

表 2.2-114 Z X915 系列船用电阻器外形尺寸
中符号 A 的尺寸

符号	Z X915-1	Z X915-2	Z X915-3	Z X915-4
A	425	625	825	1025

10.1.4 订货须知

订货时须注明

- (1) 电阻器的型号、电阻及允许电流和配线图。
- (2) 个别情况制造厂根据订货要求进行设计, 因此在订货时必须提出详细的设计资料。如: 起动用电阻必须说明:

1) 电动机的型号、规格、起动时的平均起动转矩或电动机轴上的负荷转矩。

2) 开闭装置的线路(控制器的或操纵台的)。

3) 直流电动机之励磁类别串励电动机必须阐明负荷电流与转速关系的曲线。

4) 直流电动机的线路电压或交流电动机的转子电阻。

起动调速用电阻除有上述说明外，尚须说明：

- 1) 转速的调整限度（对额定的百分比）。
- 2) 调整转速时电动机的负荷转矩及其变换条件。
- 3) 欲购之易损件图号、名称及数量。

Z X915 电阻器易损零部件见表 2. 2-115。

10.2 ZD 系列船用电阻器

ZD 系列船用电阻器体积小、质量轻、结构牢固，适合有冲击、振动要求的舰船使用。

ZD 系列船用电阻器主要技术数据见表 2. 2-116。

表 2. 2-115 Z X915 系列船用电阻器易损零部件

序号	图样代号	名称	每台最多数量	简 图
1	3KL- 8720. 003. 1~3	绝缘子	120	
2	4KL- 8770. 08	绝缘管	8	
3	5KL- 8710. 020	绝缘 垫圈	240	
4	4KL- 8720. 004	绝缘子	16	

生产厂：大连低压开关厂。

表 2. 2-116 ZD 系列船用电阻器技术数据

型号	电压 (V)	最大允许电流 (A)	电阻值范围 (Ω)	外形尺寸 (长×宽×高)	质量 (kg)	生产厂
ZC9-021	170~330	107	0. 24	460mm×400mm×284mm	237	湘潭电机厂三分厂
ZC9-003	170~330	480	0. 031	730mm×420mm×555mm	115	
ZD9-8	170~330	10. 5	8. 5	381mm×241mm×274mm	17	
ZZQ-10A	1000	350	0. 089	1100mm×500mm×670mm	220	
ZZQ-10B	1000	80	1. 8	540mm×450mm×540mm	100	

订货须知：订货时请注明型号、电压、电阻值及数量。

11 船用变阻器

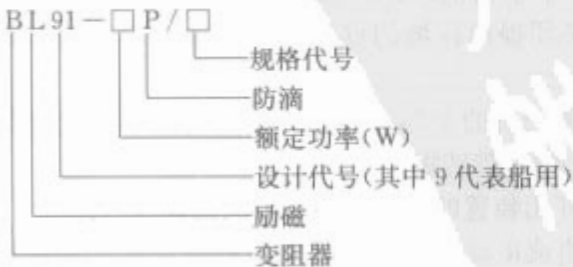
11.1 BL91 系列船用励磁变阻器

BL91 系列船用励磁变阻器适用于直流电压不超过 380V 的船舶电气设备电路中，供发电机励磁电路中作电压调整及调节直流电动机转速等用途。

该系列变阻器在下列条件下能满意工作：

- (1) 周围介质温度不高于+45℃，不低于-25℃。
- (2) 周围空气湿度不超过 95%。
- (3) 倾斜度不超过 45°。

型号说明：



11.1.1 结构简介

BL91 系列船用励磁变阻器是由瓷质电阻元件及转换装

置所组成，均安装在防滴式箱壳内，电阻元件是由电阻线绕于螺纹瓷管上制成，面板由玻璃纤维绝缘板装上转换设备，并采用桥式触头靠手轮来转动，用手轮变换电阻值，箱型为防滴式，其结构满足船用电器要求，变阻器应垂直安装，使防滴盖处于上方。

11.1.2 主要技术数据

BL91 系列船用励磁变阻器主要技术数据见表 2. 2-117。

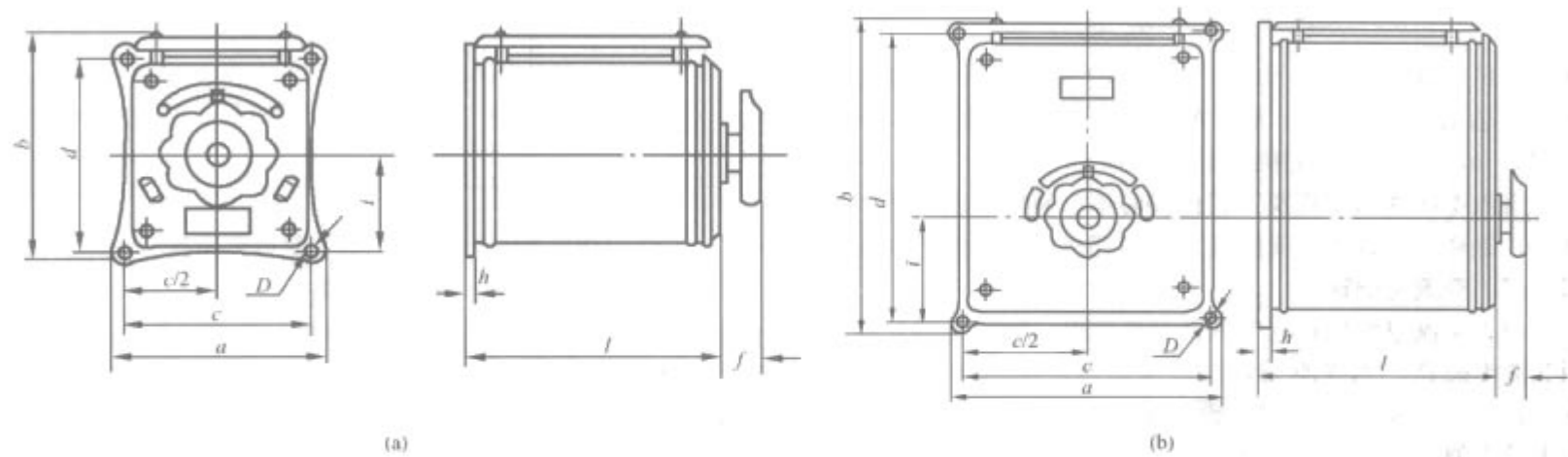
表 2. 2-117 BL91 系列船用励磁变阻器 主要技术参数

型号	额定功率 (W)	触头极限电流 (A)	级数	元件允许温升 (℃)	质量 (kg)
BL91-300	300	15	30	250	6. 5
BL91-450	450	15	30	250	7. 5
BL91-650	650	15	38	250	11. 5
BL91-900	900	15	58	250	15
BL91-1200	1200	20	62	250	24
BL91-1800	1800	20	62	250	27
BL91-2400	2400	20	62	250	30

11.1.3 外形及安装尺寸

BL91 系列船用励磁变阻器外形及安装尺寸如图 2.2-37

所示。



型号	尺 寸 (mm)								
	a	b	c	d	e	f	D	i	h
BL91-300	180	240	160±1	195±1	227	40~50	9	90	11
BL91-450					275				
BL91-650	245	280	217±1	238±1	320			126	12
BL91-900	258	432	230±1	388±1	277			130	
BL91-1200	317	466	287±1	417±1	277	11	156	16	
BL91-1800					327				
BL91-2400					377				

图 2.2-37 BL91 系列船用励磁变阻器外形及安装尺寸
(a) BL91-300~BL91-450; (b) BL91-650~BL91-2400

11.1.4 订货须知

订货时须注明:

- (1) 产品型号名称, 电阻值, 电流值或编号及数量。
- (2) 用途、调速或调压。
- (3) 特殊要求: 需要提供总功率, 总电阻, 总电流, 共分几段, 每段电流, 电阻值。

生产厂: 上海电阻厂、湖北开关厂。

11.2 BL9 系列船用励磁变阻器

BL9 系列船用励磁变阻器体积小, 质量轻, 能平滑调节励磁电流, 特别适合有耐冲击、振动要求的舰船使用。

BL9 系列船用励磁变阻器主要技术数据见表 2.2-118。

表 2.2-118 BL9 系列船用励磁变阻器主要技术数据

型号	电压 (V)	最大允许电流 (A)	电阻值范围 (Ω)	操作方式	外形尺寸 (长×宽×高)	质量 (kg)	生产厂
BL9-1	170~330	42	0.3~31.17	手动	800mm×400mm×610mm	102	湘潭电机厂三分厂
BL9-1 _V ^Z	170~330	120	0~12.8		1486mm×530mm×430mm	215	
BL9-01	170~330	5.6	282~675		378mm×320mm×399mm	30	

订货须知: 订货时请注明型号、电压及数量。

12 舰船用电磁铁

12.1 概述

电磁铁是一种通电后对铁磁物质产生吸力, 把电磁能转变为机械能的电器。舰船电磁铁与同类型的陆用电磁铁其结构是相同的, 但使用环境要比陆用产品严酷, 要承受冲击、振动及一定的倾斜角及摇摆, 因此其零部件机械强度要求较高, 尤其舰用电磁铁, 要经受 X、Y、Z 三个方向的冲击试验及振动和颠振试验, 其机械强度更有严格的要求。

舰船用电磁铁使用的环境温度较高, 并伴有凝雾及霉菌的侵蚀, 因此它们的绝缘材料、电磁线、浸渍漆等都需用专用产品, 需要经过盐雾试验、长霉试验等环境条件试验, 整

机还需经过湿热试验的考核。它们所采用的材料均是滞燃、耐久、耐潮、耐霉和低毒的, 铭牌应为铜质耐蚀材料制成。与陆用产品相比, 舰用电磁铁尺寸小, 吸力大, 操作频率高, 尤其要求释放时间小。

舰用电磁铁应满足 GJB 5A—1995《舰用低压电器通用规范》的有关规定, 船用电磁铁应满足 GB/T 3783《舰用低压电器基本要求》的有关规定。

12.2 分类

根据电磁铁励磁线圈励磁电流的性质, 电磁铁分为直流电磁铁和交流电磁铁两种。

设计电磁铁的原始数据是设计点工作气隙 δ 和吸力 F 。

12.2.1 直流电磁铁

直流磁路的特点是在稳定工作时, 线圈中的励磁电流 I

与工作气隙 δ 无关,即线圈磁动势等于常数。计算电磁吸力的基本公式为

$$F=\frac{B^2S}{2\mu_0}=\frac{\Phi^2}{2\mu_0S}$$

式中: F 为电磁吸力, N; B 为磁感应强度, T; S 为磁极表面的总面积, m^2 ; μ_0 为气隙导磁系数, 其值为 $1.25\times 10^{-8}\text{H/m}$; Φ 为工作气隙的磁通, Wb。

直流电磁铁的结构及工艺比较简单。通常直流导磁体由铁心、磁轭、衔铁或极靴组成, 它们都是由整块钢料制成。

12.2.2 交流电磁铁

由于交流电源比直流电源更容易获得, 所以舰船上也常用交流电磁铁。当线圈通以交流电时所产生的交变磁通为 $\Phi_1=\Phi_m\sin\omega t$ 。 Φ_1 代表气隙中磁通的瞬时值, Φ_m 代表气隙磁通中最大值, 把 Φ_1 代入上述公式即得到

$$\begin{aligned} F &= \frac{\Phi_1^2}{2\mu_0S} = \frac{1}{S} \left(\frac{\Phi_m^2}{2\mu_0S} \right) \sin^2\omega t = F_m \sin^2\omega t \\ &= \frac{1}{2} F_m (1 - \cos 2\omega t) \\ &= \frac{1}{2} F_m - \frac{1}{2} F_m \cos 2\omega t = F_0 + F_- \end{aligned}$$

从上式可看出两个特点:

(1) 不变分量的平均吸力 F_0 为最大吸力的一半, 即

$$F_0 = \frac{1}{2} F_m = \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi_m^2}{2\mu_0S} \right) \frac{1}{S} = \left(\frac{\Phi^2}{2\mu_0S} \right) \frac{1}{S}$$

式中: $\Phi=\frac{\Phi_m}{\sqrt{2}}$ 为磁通的有效值。

(2) 存在一个交变分量的脉动吸力, 而交变分量的频变为变化磁通频率的2倍, 即

$$F_- = \frac{1}{2} F_m \cos 2\omega t$$

在交流电磁铁工作时, 能否将衔铁吸住是平均吸力 F_0 的大小。所谓交流电磁铁吸力, 就是指它的平均吸力。

由于交流电磁铁用交流励磁, 导磁体内通过交变磁通, 产生了涡流和磁滞损耗, 导致线圈温升升高。为了降低铁心损耗, 限制线圈温升等, 这就导致了交流磁路结构和制造工艺的复杂性, 其结构工艺也远比直流电磁铁差。

交流电磁铁的导磁体通常由硅钢片、夹板、短路环及导板等零件组成。这些零部件主要由冷冲压工艺成型。

12.3 具体产品

目前舰船上由于机械化、自动化程度的不断提高, 使得电磁铁的应用范围也日益扩大。下面介绍几种舰船上常用的电磁铁。

12.3.1 MHZ-30/4 船用电磁铁

MHZ-30/4 船用电磁铁主要用于船舶千斤索绞车, 用来控制千斤索绞车的棘轮棘爪。当电磁铁通电后, 吸合衔铁, 释放绞车的棘轮, 使绞车能够转动。当电磁铁断电后, 衔铁释放, 锁住绞车的棘爪, 使绞车刹车, 不能转动。

电磁铁额定电压为直流 24V, 额定工作间隙为 4mm, 额定吸力为 300N, 工作方式为 30min 短时工作制, 每小时吸合次数不低于 120 次。

该电磁铁在 80% 额定电压即 19.2V 时, 在额定工作气隙 $\delta=4\text{mm}$ 时, 吸力也应达到 30kg。这就保证当电源为蓄电池, 电压有 20% 波动时, 电磁铁也能正常工作。

电磁铁的励磁线圈用专门的环氧配方及浇注工艺密封,

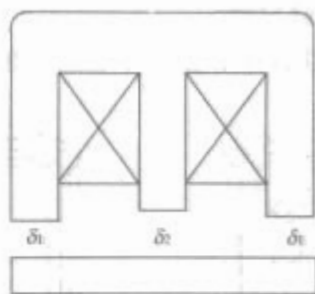


图 2.2-38 MHZ-30/4 船用电磁铁结构示意图

这样电磁铁能承受船舶正常运行中所产生的冲击、振动, 以及电磁铁工作时所产生的撞击, 而且便于使线圈的热量传递出来, 降低线圈温升。

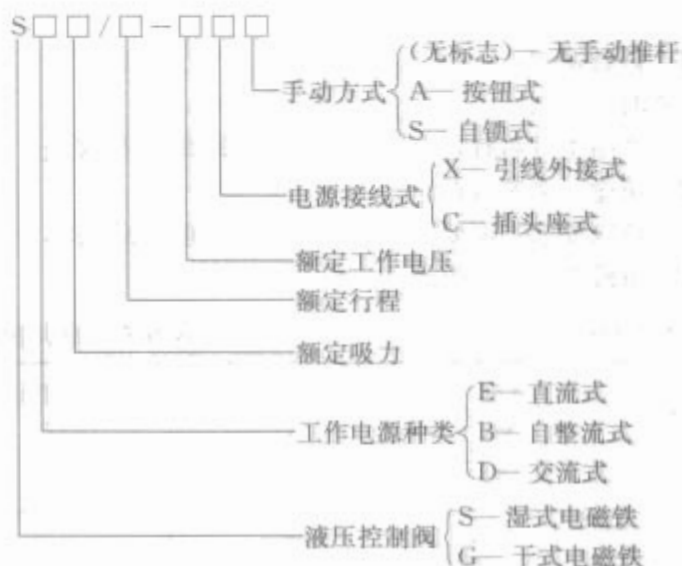
该电磁铁为盘式结构型式。盘式电磁系统的磁极面积很大, 而磁路很短, 在气隙小时能获得非常大的吸力。它有二个串联工作气隙 δ_1 和 δ_2 , 因随着气隙的增大, 吸力下降很快, 故其吸力特性非常陡峭。其结构如图 2.2-38 所示。

该电磁铁 $\delta_2>\delta_1$, 二者有 0.5mm 的差值, 这是由于当电磁铁吸合后磁路中磁通非常饱和, 当 $\delta_2>\delta_1$ 后, 衔铁吸合后磁路中还有 0.5mm 气隙存在, 磁路中磁通不至于非常饱和, 而且当电磁铁断电后, 衔铁也会较快释放。

船用甲板起重电动机非轴伸端的直流圆盘式电磁制动器也为这种型式电磁铁。直流电磁制动器已在船用异步电动机中叙述, 在此不再重复。

12.3.2 船用液压控制阀用电磁铁

型号及含义:



船用液压控制阀用电磁铁主要技术参数见表 2.2-119。

表 2.2-119 船用液压控制阀用电磁铁主要技术参数

电 源	额定吸力 (N)	额定行程 (mm)	工作额定 (1/min)
交 流	25	2.8	60 (通电率为 60%时)
	40	3.6	
直 流 (含自整流式)	15	2.8	
	25	2.8	
	55	3.6	

额定电压为:

(1) 直流: 12V、24V、36V、110V、220V。

(2) 交流: 50Hz、60Hz、24V、36V、110V、220V; 50Hz、380V; 60Hz、440V。

结构及性能：该系列电磁铁为装甲螺管型式结构。阀用电磁铁是电磁阀中的关键执行元件，阀用电磁铁结构与性能的好坏，不仅影响到电磁阀本身的质量，而且直接影响液压系统、直至整机的质量。

由于干式电磁铁所配用的电磁阀存在着密封困难，液压油容易渗漏和机械寿命较低的缺点，因此在国外 20 世纪 70 年代发展了湿式电磁铁，所谓湿式电磁铁是指压力油允许进入电磁铁的导磁腔，从而使阀和电磁铁的密封形式从动密封改为静密封。这种结构使电磁铁既解决了阀和电磁铁联结的密封问题，又提高了电磁铁本身的机械寿命，成为一种深受欢迎的电磁执行文件。我国从 20 世纪 80 年代也普遍把湿式电磁铁应用于船用液压系统中。

系列电磁铁在表 2.2-120 列出的环境条件下能正常工作。

表 2.2-120 正常工作环境		
环境空气温度	最高值	+55℃
	最低值	-25℃
高湿度影响		有
盐雾影响		有
霉菌影响		有
油雾影响		有
倾斜		≤22.5°
摇摆		≤22.5°
振动		有
冲击（指船舶正常航行时产生的冲击）		有

电源变化范围：

- (1) 交流电源的电压变化范围为额定电压的 + 6% ~ -10%。频率变化范围为额定频率的 ±5%。
- (2) 直流电源的电压变化范围为额定电压的 + 6% ~ -10%。

本系列电磁铁在按环境空气温度 + 55℃ 时，励磁绕组在额定工作电压下，温升稳定后降至额定工作电压值的 85%，其额定行程内的静态吸力不小于额定吸力值。按环境空气温度 - 25℃ 时，冷态下的励磁绕组在 110% 额定工作电压的吸合状态失电后，其剩磁力不大于额定吸力值的 15%。

由于阀用电磁铁的负载一般为弹簧，为配合起见，电磁铁的静态吸力特性设计得高于弹簧反力的 30% 左右。而影响阀用直流电磁铁静态吸力特性的主要因素是工作气隙的形状及其结构参数，只要合理地改变气隙结构参数便可获得理想的静态吸力特性。而交流电磁铁的吸力特性取决于整个磁场的结构参数，而不仅仅是以工作间隙为主的。由于交流电磁铁要考虑铁耗和短路环的损耗，所以一般在同样外形尺寸、励磁功率情况下，交流电磁铁的平均吸力总要比直流电磁铁小。

该系列的直流电磁铁的壳体和导磁板均为冲制件，二者用点焊连接起来，而交流电磁铁磁轭的设计是比较新颖的。小规格电磁铁因为硅钢片少，所以把外壳卷成圆形，装入线圈后，上下二块导磁板将其固定（导磁板也由硅钢片堆成），点焊后装成一体即可。规格较大的电磁铁磁轭要用特殊的方法将硅钢片堆叠而成。为了减少涡流损耗，交流电磁铁的导套、衔铁和挡铁都采用高电阻率的硅钢片制成。导套也由导磁材料 — 非导磁材料 — 导磁材料三部分组成，在挡铁的工作面上埋有短路环。

该系列电磁铁结构设计保证了电磁铁工作上的可靠性，从本身结构上来看，排除了衔铁被卡住的可能性，而在外部因素（如阀和阀杆被卡住）使衔铁不能处于吸合位置时，也能保证电磁铁在较长时间内不致烧毁。

该系列电磁铁的行业标准为 CB 1168—1986《船用液压控制阀用电磁铁技术条件》。

12.3.3 MFZ-15/15-JH 舰用电磁铁

MFZ-15/15-JH 舰用电磁铁主要用于舰船扬弹机，作为输弹机的机械制动。也可用于频繁操作的其他机械制动。

该电磁铁的主要技术指标如下：

- (1) 额定电压：直流 24V。
- (2) 工作制：S3 60% 断续周期工作制。
- (3) 额定行程：15mm。
- (4) 额定吸力：150N。
- (5) 全行程：18mm。
- (6) 操作频率：1800 次/h。
- (7) 外壳防护等级：防溅式。

电磁铁符合 GJB 13A《舰用低压电器通用规范》的有关规定。

该电磁铁特点为行程大、吸力大、释放时间小、操作频率高。国外，如法国、前苏联等国家的舰船扬弹机上有同类产品，主要性能指标也差不多。但它为了解决释放时间小，同时为了降低温升，采用二套励磁绕组。一套绕组电阻值小，用来吸引衔铁。当衔铁被吸合后，通过中间继电器串联一套电阻值大的绕组，此时电流小，磁通小，因此释放时间就小，而且温升也低，尺寸也可相应缩小。但它结构较复杂，而且必须带有中间继电器等附件，对舰用电磁铁的抗冲击、振动带来很大难度。

该电磁铁结构如图 2.2-39 所示，其特点为：

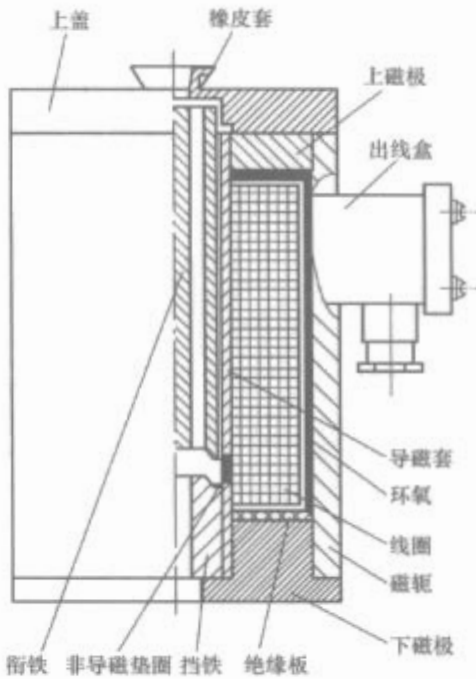


图 2.2-39 MFZ-15/15-JH 舰用电磁铁结构示意图

- (1) 在线圈与衔铁间装有磁衬套与隔磁环，挡铁与衔铁采用盆锥式结构，使电磁铁在大气隙时增大气隙磁导，提高初始吸力。
- (2) 在挡铁与衔铁之间设有非导磁垫片，使衔铁吸合时磁路中仍有气隙仍在，使磁路磁通不至于太饱和。而且线圈断电后，能较快地释放衔铁。
- (3) 在衔铁上具有一 φ6 通孔，当衔铁上下工作时，空气可快速流动，这样减少动作时间，达到频繁操作的要求。

(4) 采用专门的结构工艺、环氧配方及浇注工艺密封励磁线圈，使电磁铁能满足耐冲击、振动等舰用电器所规定的环境条件下能正常工作的要求，又能达到吸力、温升等技术指标。

(5) 为了防止导磁套的侧壁对衔铁壁产生有害的吸力，并尽量减少衔铁运动时产生侧壁摩擦力，在衔铁表面镀上一层铬，或在导磁套内侧套上一只非导磁不锈钢管，不仅达到上述二个目的，而且还有利于导向和焊接。

该电磁铁为螺管式结构型式。螺管式电磁系统在衔铁处于闭合位置时，由于只有一个工作气隙，故吸力约为其他型式电磁系统的一半。螺管式电磁系统除磁极端面的吸力外，尚有漏磁产生的螺管力作用在衔铁上。对于无挡铁螺管式，其磁极端面的吸力较小，由于气隙增大时，漏磁产生的螺管力变化不大，使吸力特性比较平坦。对于有挡铁的螺管式，磁极端面的吸力较大。其吸力特性如图 2.2-40 所示。

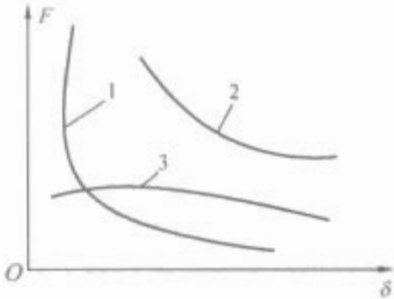


图 2.2-40 吸力特性

1—盘式；2—有挡铁螺管式；3—无挡铁螺管式

对于同一类型电磁系统，采用不同的磁极形状，可获得不同的吸力特性。如螺管式系统的极面制成圆锥形，即可获得较平坦的吸力特性。

12.3.4 H-MZ 舰用直流电磁铁

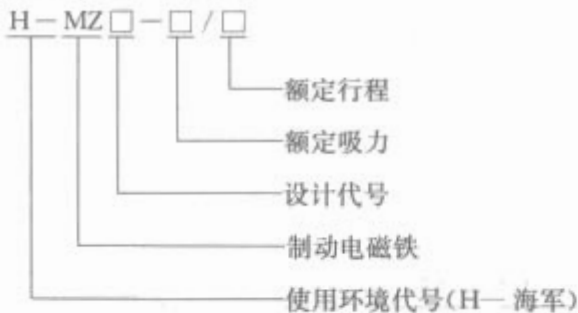
H-MZ 舰用直流电磁铁用于舰船机械制动，其主要技术参数见表 2.2-121。

表 2.2-121 H-MZ 舰用直流电磁铁主要技术参数			
型 号	额定电压 (V)	额定吸力 (N)	额定行程 (mm)
H-MZ11-79/2	110	79	2
H-MZ12-40/8	110	40	8
H-MZ13-255/22	320 (281~354)	255	22

电磁铁为长期工作制，操作频率为 1200 次/h。外壳防护等级为防溅式（但电磁铁与阀联接处除外）。在周围空气温度为-25℃~+50℃范围内，电磁铁励磁绕组电压为额定值的 85%~110%范围内，电磁铁均能可靠性吸合。电磁铁断电后，其剩磁力不大于额定吸力的 18%，即电磁铁电压为额定值和负载为 18%额定负载时，当励磁绕组电源被切断后，其衔铁即回复至原来位置，而不会停留在任意中间位置。

电磁铁的机械寿命为 100 万次吸合和释放。

型号及含义：



电磁铁为螺管式结构型式。

第 3 章 船 用 灯 具

1 船用电气号灯

1.1 范围

本节适用于在船舶上安装、使用的电气号灯，包括：左舷灯（红）、右舷灯（绿）、桅灯（白）、尾灯（白）、环照灯（红、白、绿、黄）等。

1.2 技术要求

- (1) 电气号灯应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。
- (2) 电气号灯应能在环境温度 -25℃~+50℃ 范围内正常工作，其玻璃件应能承受温度骤变。
- (3) 电气号灯的结构应满足以下要求：
 - 1) 便于拆装、升降、更换零件及手提，并能防止灯泡松动和脱出。
 - 2) 采用外部接线的方式。
 - 3) 除环照灯外，灯壳顶部应有指示船首或船尾方向的箭头标志。
 - 4) 外壳防护等级应至少为 IP55，且壳体上有自动漏水装置。
 - 5) 灯壳内部应涂无光黑漆。
 - 6) 在透镜或滤色片的边缘处应刻有厂名（或商标）和认可号。
 - 7) 灯壳外部应有铭牌。内容包括灯名、能见距离、灯泡规格、电源电压、生产厂名、出厂编号、制造日期等。
- (4) 电气号灯内不应有粗糙的突出物、尖角和突然的弯曲，并使绝缘导体具有足够大的通道。所有电缆的输出口应有圆滑的边或加了合适的衬套，且应确保导体对接线端子不会产生压力。
- (5) 电气号灯的冷态绝缘电阻应不小于 100MΩ；湿热试验后，热态绝缘电阻应不小于 10MΩ。
- (6) 电气号灯的设计及安装应确保在导电部分及它们的绝缘上不会堆积灰尘和水汽。
- (7) 电气号灯的导电部分应与外壳或内部附件绝缘。
- (8) 电气号灯所有的金属部分应能导电并具有合适的接地端子。
- (9) 电气号灯应有足够的散热结构。
- (10) 电气号灯在使用过程中能接触到的表面温度通常应不超过 60℃。
- (11) 供电电缆接线端子的温升应不超过 40℃。
- (12) 内部连接的电线应具有符合灯具内最大温度的温度级。
- (13) 电气号灯的光学性能应满足以下要求：
 - 1) 色度应符合国际照明委员会（CIE）为每种颜色规定的图解区域界限内，每种颜色的区域界限是用折角点的坐标表示的，如表 2.3-1 和图 2.3-1 所示。
 - 2) 电气号灯的最低发光强度应以下式计算，并导出数值选例在表 2.3-2。

$I = 3.43 \times 10^6 TD^2 K^{-D}$

式中， I 为发光强度，cd； T 为临阈系数， $2 \times 10^{-7} \text{ lx}$ ； D 为能见距离，n mile； K 为大气透射率，0.8。

表 2.3-1 每种颜色的区域界限折角点的坐标

颜色	坐标	坐 标 值					
白色	X	0.525	0.525	0.452	0.310	0.310	0.443
	Y	0.382	0.440	0.440	0.348	0.283	0.382
绿色	X	0.028	0.009	0.300	0.203	—	—
	Y	0.382	0.723	0.511	0.356	—	—
红色	X	0.680	0.660	0.735	0.721	—	—
	Y	0.320	0.320	0.265	0.259	—	—
黄色	X	0.612	0.618	0.575	0.575	—	—
	Y	0.382	0.382	0.425	0.406	—	—

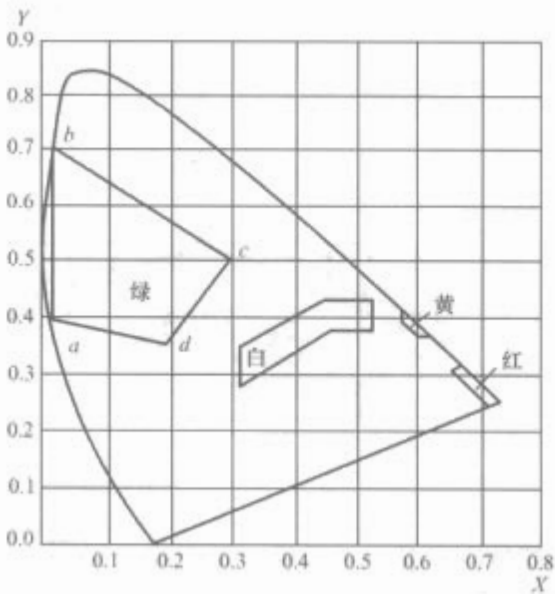


图 2.3-1 号灯色度坐标区域界限图解

表 2.3-2 导出数值选例

所要求的能见距离 (n mile)	最低发光强度 (cd)
1	0.9
2	4.3
3	12
4	27
5	52
6	94

注 航海号灯的最大发光强度应予以限制，以防过度的光耀，但不应该使用发光强度可变控制的方法。

- 3) 电气号灯应具有上款规定的发光强度，以便在下列最小距离上能被看到：
 - a. 长度为 50m 或 50m 以上的船舶：
 - 桅灯，6n mile。
 - 舷灯，3n mile。
 - 尾灯，3n mile。

- 拖带灯, 3n mile。
- 白、红、绿或黄色环照灯, 3n mile。
- b. 长度为 12m 或 12m 以上但小于 50m 的船舶:
 - 桅灯, 5n mile; 但长度小于 20m 的船舶, 3n mile。
 - 舷灯, 2n mile。
 - 尾灯, 2n mile。
 - 拖带灯, 2n mile。
 - 白、红、绿或黄色环照灯, 2n mile。
- c. 长度小于 12m 的船舶:
 - 桅灯, 2n mile。
 - 舷灯, 1n mile。
 - 尾灯, 2n mile。
 - 拖带灯, 2n mile。
 - 白、红、绿或黄色环照灯, 2n mile。
- d. 不易觉察的、部分淹没的被拖船舶或物体:
 - 白色环照灯, 3n mile。

4) 电气号灯的水平光弧:

a. 船上所装的舷灯, 在朝前方向上, 应显示最低要求的发光强度, 发光强度在规定光弧外 1° 至 3° 之间, 应减弱以达到切实断光, 见图 2.3-2。

b. 尾灯和桅灯, 以及舷灯在正横后 22.5° 处, 应在水平弧内保持最低要求的发光强度, 直到规定的光弧界限 (尾灯 135° , 从正后方到每一舷 67.5° ; 桅灯 225° , 从正前方到每

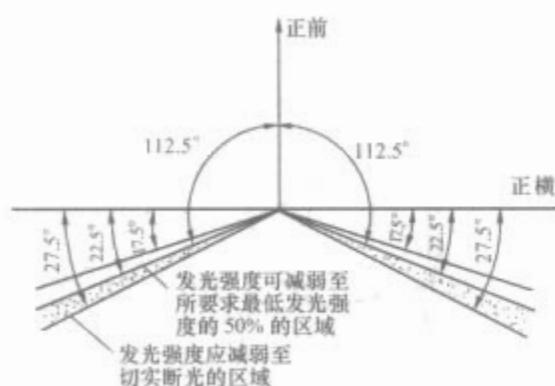


图 2.3-3 桅灯、尾灯光束分布示意图

c. 环照灯应安置在不受桅、顶桅或上层建筑大于 6° 角光弧的遮蔽的位置, 但锚灯除外。锚灯不必安置在船体以上不切实际的高度。

d. 如果仅显示 1 盏环照灯无法符合上述③的要求, 则应使用 2 盏环照灯, 固定于适当位置或用挡板遮挡使其在 1n mile 距离上看尽可能象是 1 盏灯。

5) 电气号灯的垂向光弧:

a. 从水平线上方 5° 至水平线下方 5° 的所有角度内, 至少保持所要求的最低发光强度。

b. 从水平线上方 7.5° 至水平线下方 7.5° , 至少保持所要求的最低发光强度的 60%。

1.3 电气号灯的供电与控制

(1) 每一航行灯 (电气号灯) 应由安装在驾驶室易于接近位置上的航行灯控制箱引出的独立分路供电, 而且这些分路的两个绝缘极上能由安装在该控制箱内的开关和熔断器或断路器进行控制和保护。所设的双套灯具应能在控制板上转换。

(2) 航行灯控制箱应能直接或通过变压器由应急配电板和临时应急蓄电池充放电板供电, 或者直接由应急配电板和主配电板供电。在航行灯控制箱或驾驶室适当位置设置电源

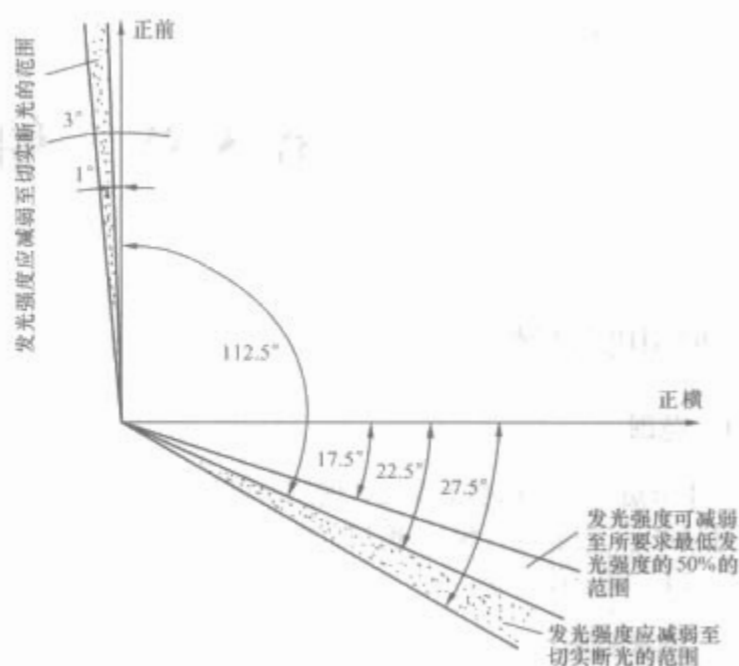
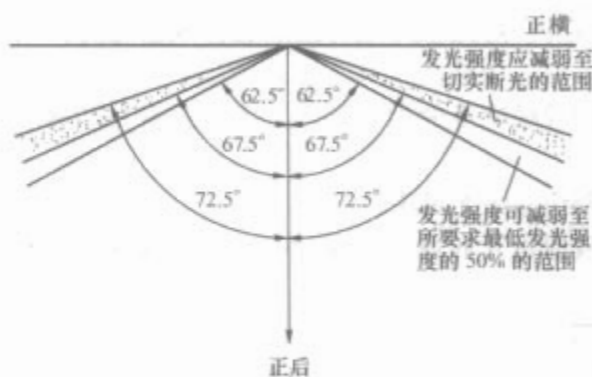


图 2.3-2 舷灯光束分布示意图

一舷的正横后 22.5° ; 舷灯 112.5° , 从正前方到各自一舷的正横后 22.5° 内 5° 。从规定的光弧内 5° 起, 发光强度可以减弱 50%, 直到规定的界限; 然后, 发光强度应不断减弱, 以达到规定光弧以外至多 5° 处切实断光。见图 2.3-3。



转换开关。

(3) 应设置当每一航行灯及航行灯控制箱发生故障时能发出听觉和视觉报警信号的自动指示器。如果采用与航行灯串联连接的灯光信号, 应该有防止由于信号故障而导致航行灯熄灭的措施。对 500 总吨以下的船舶可免除该条要求。

1.4 号灯的配备

1.4.1 在航机动船

(1) 在航机动船应显示:

- 1) 前部一盏桅灯。
- 2) 第 2 盏桅灯, 后于并高于前桅灯; 长度小于 50m 的船舶, 不要求显示该桅灯, 但可以设置第 2 盏桅灯。
- 3) 2 盏舷灯。
- 4) 1 盏尾灯。

(2) 长度小于 12m 的机动船, 可以显示 1 盏环照灯和舷灯以代替 1.4.1 (1) 规定的号灯。

(3) 长度小于 7m 且其最高速度不超过 7nk (节) 的机动船, 可以显示 1 盏环照灯和舷灯以代替 1.4.1 (1) 规定的号灯。如可行, 也应显示舷灯。

(4) 长度小于 12m 的机动船的桅灯或环照白灯, 如果不可能装设在船的首尾中心线上, 可以离开中心线显示; 如

果其舷灯合并成1盏,则应装在船的首尾中心线,或尽量装设在桅灯或环照灯所在的首尾线附近。

1.4.2 拖带和顶推

(1) 机动船当拖带时应显示:

1) 垂直2盏桅灯,以取代1.4.1(1)1)或2)规定的号灯。当从拖船船尾量到被拖物体后端的拖带长度超过200m时,垂直显示3盏这样的号灯。

2) 2盏舷灯。

3) 1盏尾灯。

4) 1盏拖带灯垂直于尾灯的上方。

5) 当拖带长度超过200m时,在最易见处显示1个菱形体号型。

(2) 当一顶推船和一被顶推船牢固地连接成一组合体时,则应作为一艘机动船,显示1.4.1(1)规定的号灯。

(3) 机动船当顶推或旁拖时,除组合体外,应显示:

1) 垂直2盏桅灯,以取代1.4.1(1)1)或2)规定的号灯。

2) 2盏舷灯。

3) 1盏尾灯。

(4) 适用的1.4.2(1)或(3)的机动船,还应遵守1.4.1(1)2)的规定。

(5) 除1.4.2(7)所述外,一被拖船或被拖物体应显示:

1) 2盏舷灯。

2) 1盏尾灯。

3) 当拖带长度超过200m时,在最易见处显示1个菱形体号型。

(6) 任何数目的船舶如作为一组被旁拖或顶推时,应作为一艘船来显示号灯:

1) 一艘被顶推船,但不是组合体的组成部分,应在前端显示2盏舷灯。

2) 一艘被旁拖的船应显示一盏尾灯,并在前端显示2盏舷灯。

(7) 一艘不易觉察的、部分淹没的被拖船舶或物体或者这类船舶物体的组合体应显示:

1) 除弹性拖曳体不需要在前端或接近前端处显示灯光外,如宽度小于25m,在前后两端或接近前后两端处各显示1盏环照白灯。

2) 如宽度为25m或25m以上时,在两侧最宽处或接近最宽处,另加2盏环照白灯。

3) 如长度超过100m,在上述1)和2)规定的号灯之间,另加若干环照白灯,使得这些灯之间的距离不超过100m。

4) 在最后一艘被拖船舶或物体的末端或接近末端处,显示1个菱形体号型,如果拖带长度超过200m时,在尽可能前部的最易见处加1个菱形体号型。

(8) 凡由于任何充分理由,一被拖船舶或物体不可能显示1.4.2(5)或(7)规定的号灯或号型时,应采取一切可能的措施使被拖船舶或物体上有灯光,或者至少能表明这种船舶或物体的存在。

(9) 凡由于任何充分理由,使得一艘通常不从事拖带作业的船舶不可能按1.4.2(1)或(3)的规定显示号灯,这种船舶在从事拖带另一遇险或需救助的船舶时,就不要求显示这些号灯。但应采取如下一切可能的措施:如有必要招引其他船注意,任何船舶可以发出灯光或声响信号,但这种信号应不致被误认为《1972国际海上避碰规则》其他各条所

准许的任何信号,或者可用不致妨碍任何船舶的方式,把探照灯的光束朝着危险的方向。任何招引其他船注意的灯光,应不致被误认为是任何助航标志的灯光。为此目的,应避免使用诸如频闪灯这样高亮度的间歇灯或旋转灯。所准许的一切可能措施来表明拖船与被拖船之间关系的性质,尤其应将拖缆照亮。

1.4.3 失去控制或操纵能力受到限制的船舶

(1) 失去控制的船舶应显示:

1) 在最易见处,垂直2盏环照红灯。

2) 在最易见处,垂直2个球体或类似的号型。

3) 当对水移动时,除上述1)规定的号灯外,还应显示2盏舷灯和1盏尾灯。

(2) 操纵能力受到限制的船舶,除从事清除水雷作业的船舶外,应显示:

1) 在最易见处,垂直3盏环照灯,最上和最下者应是红色、中间1盏应是白色。

2) 在最易见处,垂直3个号型,最上和最下者应是球体、中间1个应是菱形体。

3) 当对水移动时,除上述1)规定的号灯外,还应显示桅灯、舷灯和尾灯。

4) 当锚泊时,除上述1)和2)规定的号灯或号型外,还应显示1.4.6规定的1盏或2盏号灯或号型。

(3) 从事一项使拖船和被拖体双方在偏离所驶航向上的能力上受到严重限制的拖带作业的机动船,除显示1.4.2(1)规定的号灯或号型外,还应显示1.4.3(2)1)、2)和3)规定的号灯或号型。

(4) 从事疏浚或水下作业的船舶,当其操纵能力受到限制时,应显示1.4.3(2)1)、2)和3)规定的号灯或号型。此外,当存在障碍物时,还应显示:

1) 在障碍物存在的一舷,垂直2盏环照红灯或2个球体。

2) 在他船可以通过的一舷,垂直2盏环照绿灯或2个菱形体。

3) 当锚泊时,应显示上述1)和2)规定的号灯或号型以取代1.4.6规定的号灯或号型。

(5) 当从事潜水作业的船舶其尺度使之来可能显示上一条规定的号灯和号型时,则应显示:

1) 在最易见处,垂直3盏环照灯,最上和最下者应是红色、中间1盏应是白色。

2) 一个国际信号旗“A”的硬质复制品,其高度不小于1m,并应采取措施以保证周围都能见到。

(6) 从事清除水雷作业的船舶,除第1.4.1为机动船规定的号灯或1.4.6为锚泊船规定的号灯或号型外,还应显示3盏环照绿灯或3个球体。这些号灯或号型之一应在接近前桅桅顶处显示,其余应在前桅桁两端各显示1个。这些号灯或号型表示他船驶近至清除水雷船1000m以内的危险的。

(7) 除从事潜水作业的船舶外,长度小于12m的船舶,不要求显示本条规定的号灯和号型。

1.4.4 限于吃水的船舶

限于吃水的船舶,除1.4.1为机动船规定的号灯外,还可以在易见处显示3盏环照红灯,或者1个圆柱体。

1.4.5 引航船舶

(1) 执行引航任务的船舶应显示:

1) 在桅顶或接近桅顶处,垂直2盏环照灯,上白下红。

2) 当在航时,外加舷灯和尾灯。

3) 当锚泊时,除上述1)规定的号灯外,还应显示

1.4.6 对锚泊船规定的号灯或号型。

(2) 引航船当不执行引航任务时,应显示为其同样长度的同类船舶规定的号灯和号型。

1.4.6 锚泊船舶和搁浅船舶

(1) 锚泊中的船舶应在最易见处显示:

1) 在船的前部,1盏环照白灯或1个球体。

2) 在船尾或接近船尾并低于上述1)规定的号灯处,1盏环照白灯。

(2) 长度小于50m的船舶,可以在最易见处显示1盏环照白灯,以取代上条规定的号灯。

(3) 锚泊中的船舶,还可以使用现有的工作灯或同等的灯照明甲板,而长度为100m及100m以上的船舶应当使用这类灯。

(4) 搁浅的船舶应显示以上(1)或(2)规定的号灯,并在最易见处外加。

(5) 长度小于7m的船舶,不是在狭水道、航道、锚地或其他船舶通常航行的水域中或其附近锚泊时,不要求显示以上(1)或(2)规定的号灯或号型。

(6) 长度小于12m的船舶搁浅时,不要求显示以上(4)规定的号灯和号型。

1.4.7 地效翼船

当地效翼船不可能设置本节各条款规定的各种特性或位置的号灯时,至少应设舷灯。

1.4.8 双套灯具

航行灯应配备双套灯具。

1.5 号灯的安装

1.5.1 号灯的垂向位置和间距

(1) 长度为20m或20m以上的机动船,桅灯应安置如下:

1) 前桅灯,或如只装设1盏桅灯,则该桅灯在船体以上的高度应不小于6m;如船的宽度超过6m,则在船体以上的高度应不小于该宽度,但是该灯安置在船体以上的高度不必大于12m。

2) 当装设2盏桅灯时,后灯高于前灯的垂向距离应至少为4.5m。

(2) 机动船的2盏桅灯的垂向距离应是这样:即在一吃正常吃水差的情况下,当从距离船首1000m的海面观看时,应能看出后灯在前灯的上方并且分开。

(3) 长度为12m或12m以上但小于20m的机动船,其桅灯安置在船体以上的高度应不小于2.5m。

(4) 长度小于12m的机动船,可以把最上面的1盏号灯装在船体以上小于2.5m的高度。但当在舷灯和尾灯之外设有1盏桅灯时,或1.4.1(3)规定的环照灯时,则该桅灯或环照灯的设置至少应高于舷灯1m。

(5) 为从事拖带或顶推他船的机动船所规定的2盏或3盏桅灯中的1盏,应安置在前桅灯或后桅灯相同的位置。如果该灯装在后桅上,则该最低的后桅灯高于前桅灯垂向距离应不少于4.5m。

(6) 1.4.1(1)规定的桅灯,除下条所述外,应安置在高于并离开其他一切灯光和遮蔽物的位置上。

(7) 当低于桅灯的位置上不可能装设1.4.3(2)1)或者1.4.4规定的环照灯,这些环照灯可以装设在后桅灯上方或悬挂于前桅灯和后桅灯垂向之间。如属后一种情况,则应符合1.5.2(3)的要求。

(8) 机动船的舷灯安置在船体以上的高度,应不超过前

桅灯高度的3/4。这些舷灯不应低到受甲板灯光的干扰。

(9) 长度小于20m的机动船的舷灯,如并为1盏,则应安置在低于桅灯不小于1m处。

(10) 当本节规定垂直装设2盏或3盏号灯时,这些号灯的间距如下:

1) 长度为20m或20m以上的船舶,这些号灯的间距应不小于2m,而且除需要拖带号灯的情况下,这些号灯的最低1盏,应装设在船体以上高度不小于4m处。

2) 长度小于20m的船舶,这些号灯的间距应不小于1m,而且除需要拖带号灯的情况下,这些号灯的最低1盏,应装设在船体以上高度不小于2m处。

3) 当装设3盏号灯时,其间距应相等。

(11) 当装设2盏号灯时,1.4.6(1)1)规定的前锚灯应高于后锚灯不小于4.5m。长度为50m或50m以上的船舶,前锚灯应装设在船体以上高度不小于6m处。

1.5.2 号灯的水平位置和间距

(1) 当机动船按规定有2盏桅灯时,2灯之间的水平距离应不小于船长的一半,但不必大于100m。前桅灯应安置在离船首不大于船长的1/4处。

(2) 长度为20m或20m以上的机动船,舷灯不应安置在前桅灯的前面,这些舷灯应置在舷侧或接近舷侧处。

(3) 当1.4.3(2)1)或者1.4.4规定的号灯设置在前桅灯和后桅灯垂向之间时,这些环照灯应安置在与该船首尾中心线正交的横向水平距离不小于2m处。

(4) 当机动船按规定仅有1盏桅灯时,该灯应在船中之前显示。长度小于20m的船舶不必在船中之前显示该灯,但应在尽可能靠前的位置上显示。

1.5.3 舷灯遮板

长度在20m或20m以上的船舶的舷灯,应装有无光黑色的内侧遮板,并符合1.2(13)4)的要求。长度小于20m的船舶的舷灯,如需符合1.2(13)4)的要求,则应装有无光黑色的内侧遮板。用单一起立灯丝并在绿色和红色两部分之间有1条很窄分界线的合座灯,可不必装配外部遮板。

1.5.4 安装角度

除舷灯外,所有号灯安装时,其灯壳上的箭头应沿船首尾中心线指向船首或船尾。

1.5.5 高速船

长宽比小于3.0的高速船,如果舷灯和桅灯形成的等腰三角形的底角在侧视时不小于 27° ,则其桅灯可置于相应于船宽,低于1.5.1(1)规定的高度上。

1.6 选型要点

(1) 电气号灯应获得国家主管部门或船级社的型式认可证书方可装船使用。

(2) 在船舶上安装、使用的电气号灯应按国家主管部门或船级社的要求进行检验和试验以验证其满足本节1.2条要求。

(3) 应根据船舶的长度以及本节1.2(13)3)规定选择电气号灯的种类和规格。

2 船用白昼信号灯

2.1 范围

本节适用于船舶在白天和夜晚、船与船之间、船与岸之间通过光信号传递信息的白昼通信信号灯。

2.2 技术要求

(1) 白昼信号灯应能在第1篇第3章所述的环境下可靠工作。

(2) 白昼信号灯应能在环境温度 $-25^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 范围内正常工作,其玻璃件应能承受温度骤变。

(3) 白昼信号灯内不应有粗糙的突出物、尖角和突然的弯曲,并使绝缘导体具有足够大的通道。所有电缆的输出口应有圆滑的边或加了合适的衬套,且应确保导体对接线端子不会产生压力。

(4) 白昼信号灯的冷态绝缘电阻应不小于 $100\text{M}\Omega$;湿热试验后,热态绝缘电阻应不小于 $10\text{M}\Omega$ 。

(5) 白昼信号灯的设计及安装应确保在导电部分及它们的绝缘上不会堆积灰尘和水气,也不能积聚凝固水。

(6) 白昼信号灯的导电部分应与外壳或内部附件绝缘。

(7) 白昼信号灯应有足够的散热结构。在使用过程中能接触到的表面温度通常应不超过 60°C ,供电电缆接线端子的温升不应超过 40°C ,内部连接的电线应具有符合灯具内最大温度的温度级。

(8) 白昼信号灯的发光体应安装在灯内,避免使用螺口灯座。

(9) 白昼信号灯应被设计成发光体在夜晚也能被更换。

(10) 白昼信号灯的瞄准器应以一固定姿势与光轴平行安放。

(11) 白昼信号灯的所有部件应由抗磁性材料制成,并能适应使用时产生的热量。

(12) 白昼信号灯不能只依靠船上的主电源或应急电源工作,应为其提供一个总重量不超过 7.5kg 的便携式蓄电池。蓄电池的容量应能使白昼信号灯正常工作不少于 2h 。

(13) 白昼信号灯及其蓄电池应被设计成在使用状态具有安全把手,并应能够被戴手套的人员使用。

(14) 白昼信号灯应适合于发出光信号。该光信号能被观察者在视觉上清楚地辨别出是单独的信号。在白天具有 0.8 的大气透视率时,白昼信号灯发出的光信号的可见度应至少为 2 海里,等于具有 $60\,000\text{cd}$ 的发光强度。白昼信号灯的轴向发光强度应至少达到最大发光强度的 90% 。

(15) 白昼信号灯的发光强度应在发光强度分布的中心最大,并向周围逐渐减弱。半角发散值 α_h 应不大于 9° ,十分之一角发散值 α_z 应不大于 14° 。

(16) 白昼信号灯发出的信号光的颜色应在国际光学委员会(CIE)出版物No2.2规定的下列直角坐标图内:

$X: 0.525 \quad 0.525 \quad 0.452 \quad 0.310 \quad 0.310 \quad 0.443$

$Y: 0.382 \quad 0.440 \quad 0.440 \quad 0.348 \quad 0.283 \quad 0.382$

(17) 白昼信号灯的有效发光部分应是圆形的。开灯和关灯时间之和应不超过 500 毫秒。

(18) 白昼信号灯应具有表明其工作状态的指示。

(19) 每个白昼信号灯应备有至少 3 个满足型式认可要求的发光体。

(20) 在白昼信号灯上应清晰地标有生产厂(商)的名称或商标、产品型号、产品编号、生产日期等信息,这些信息应耐久并不易被磨灭。

(21) 白昼信号灯的发光体上应清晰、耐久地标明生产厂商的名称和功率。

(22) 白昼信号灯的随机文件或说明书上应包括以下信息:

1) 生产厂名称。

2) 型号。

3) 对设备的总的描述以及辅助设备的描述。

4) 主要连接信息。

5) 供电数据(电压、功率等)。

6) 起动程序描述。

7) 描述对瞄准仪和发光强度轴平行调整检查方法。

8) 发光体的更换描述。

9) 瞄准仪调整描述。

10) 要求的特殊工具、维护材料和备件(如备用发光体、熔丝、镜和盖)。

11) 船上维护和保养及可提供的服务。

2.3 选型要点

(1) 白昼信号灯应获得国家主管部门或船级社的型式认可证书方可装船使用。

(2) 白昼信号灯应按国家主管部门或船级社的要求进行检验和试验以验证其满足本节2.2条要求。试验方法按IMO决议A.694(17)和IEC 60945规定。

(3) 选择白昼信号灯时应为其配置白昼信号灯生产厂生产的、经型式试验合格的便携式蓄电池。

3 船用信号灯

3.1 范围

本节适用于在船舶上安装、使用的信号灯。

3.2 技术要求

信号灯应满足本章第1节适用要求。

3.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的信号灯应按国家主管部门或船级社的要求进行检验和试验以验证其满足本节3.2条要求。

(2) 应根据使用需要选择信号灯的种类和规格。

4 船用投光灯(探照灯)

4.1 范围

本节适用于在船舶上安装使用的电源电压不超过 1000V 的钨丝灯、管状荧光灯和其他气体放电灯的投光灯具(Floodlight)和探照灯(Searchlight)。

4.2 技术要求

投光灯具应能在第1篇第3章所述的环境下可靠工作。

(1) 投光灯具应能在环境温度 $-25^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 范围内正常工作,其玻璃件应能承受温度骤变。

(2) 投光灯具应清晰、耐久的标志。标志的内容应满足GB 7000.1第3章要求。

(3) 投光灯具的结构除应满足GB 7000.1第4章要求外,还应满足以下要求:

便于拆装、升降和更换零件,并能防止灯泡松动和脱出。

外壳防护等级应至少为IP44。试验方法见GB 7000.1。

灯具内部不应有粗糙的突出物、尖角和突然的弯曲,并使绝缘导体具有足够大的通道。所有电缆的输出口应有圆滑的边或加了合适的衬套,且应确保导体对接线端子不会产生

压力。

应有足够的散热结构。

所使用的灯座座架和光源支架，在投光灯具的整个寿命期内应经得起正常的使用。它们应接纳和保持尺寸公差在光源国家或 IEC 标准规定范围内的光源，并应将光源固定在灯具中控光装置的设计位置上。

1) 如果为适应不同尺寸的光源或光中心位置采取了结构措施，那么应有确定的调节方式并可在选定的集团上牢固保持。

2) 折射器、反射器或其他光控元件应具有适当标记或结构，使其在安装和调换时相对于光源只能保持在正确的位置上。

3) 将投光灯装于其支架上的方式，应与投光灯的重量相适宜，所有连接部分应能经得起在灯具投影面上 150km/h 风速而无明显的缺陷。

4) 无论在使用或维修期间，承受投光灯具和内部附件重量的；固定机构应提供适宜的方式以防止投光灯具的任何部件因振动而引起的松动。

5) 除了用至少两个装置（如螺钉或具有足够强度的类似装置）固定外，投光灯具的部件应有附加的防护，在万一正常条件下一个固定装置失效时防止这些部件坠落，导致危及人、动物和周围环境。

6) 具有旋转连接点的投光灯具，可以不满足上一条款要求，但必须进行以下试验以验证连接点的强度。试验方法是：将正视时投光灯具的最大投影面水平放置，并以制造厂推荐的方法固定，用沙袋作为恒定均匀分布的负载，加在投光灯具上并保持 10min。沙袋的质量为在投光灯具投影面积上产生 2.4kN/m² 的压强。然后将投光灯具在垂直平面内绕连接点旋转 180°。重复该试验。在试验期间，连接点不应损坏或移位，并在试验确定的两个过程后，都不应有超过 1° 的永久变形。

7) 当提供角度调节装置时，在完成角度调节后，应有定位锁紧措施。

8) 玻璃罩的玻璃在破碎时应碎成很小的碎片，或应提供带有足够小网眼的防护物，或使用能保持住玻璃碎片的复膜玻璃。试验方法见 GB 7000.7。

(4) 投光灯具电气元件间的爬电距离、电气间隙应满足 GB 7000.1 要求。

(5) 投光灯具的冷态绝缘电阻应不小于 100MΩ；湿热试验后，热态绝缘电阻应不小于 10MΩ。

(6) 投光灯具的设计及安装应确保在导电部分及它们的绝缘上不会堆积灰尘和水气。

(7) 投光灯具的导电部分应与外壳或内部附件绝缘。

(8) 投光灯具所有的金属部分应能导电并具有合适的接地端子，并满足 GB 7000.1 要求。

(9) 供电电缆接线端子应满足 GB 7000.1 要求，其温升不应超过 40℃。

(10) 投光灯具内部连接的电线应具有符合灯具内最大温度的温度级。

(11) 投光灯具应有防触电保护，且应满足 GB 7000.1 要求。

(12) 与投光灯具分开安装的所有独立的镇流器、电容器和其他附件，均应安装在接地的金属盒中。

(13) 如灯具内部安装有等于和大于 0.5μF 的电容器，应设有当电源一断开就迅速放电的措施。

(14) 灯座应以滞燃的和不吸潮的材料制成。所有金属

部件的结构应牢固，E40 型灯座应有把灯泡锁牢在灯座上的措施。

(15) 钨丝灯的灯座型式应满足表 2.3-3 要求。

(16) 钨丝灯的灯座电压和负载应不超过表 2.3-3 要求。

表 2.3-3 钨丝灯电压与负载

灯座型式		电压 (V)	负 荷
插口式	B22	250	200W/4A
	B15d	250	15W/2A
	B15s	55	15W/2A
螺旋式	E40	250	3000W/16A
	E27	250	200W/4A
	E14	250	15W/2A

4.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的投光灯具应按船级社规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 4.2 条要求。

(2) 应根据投光灯具的安装位置选择其外壳防护等级。

(3) 应根据使用要求选择投光灯或探照灯。如需要获得较大范围的投光照明或泛光照明，应选用投光灯；如需要将照明范围集中在一个较小的范围，或在一个较小范围内获得较大的亮度，或向较远处发送灯光信号，则应选用探照灯。

5 船用荧光照明灯

5.1 范围

本节适用于在船舶上安装使用的电源电压不超过 250V 的以荧光灯为光源的照明灯具。如船用篷顶灯、舱顶灯、角灯、壁灯、床头灯等。

5.2 技术要求

(1) 荧光照明灯具应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。

(2) 荧光照明灯具一般应是经“CCC”认可的安全型式。

(3) 荧光照明灯具应由不燃的且耐腐蚀的材料制成。

(4) 灯具应便于拆装、升降和更换零件，并能防止灯管松动和脱出。

(5) 灯具的外壳防护等级应至少为 IP20。试验方法见 GB 7000.1。

(6) 灯具内部不应有粗糙的突出物、尖角和突然的弯曲，并使绝缘导体具有足够大的通道。所有电缆的输出口应有圆滑的边或加了合适的衬套，且应确保导体对接线端子不会产生压力。

(7) 灯具应有足够的散热结构。

(8) 灯具的设计及安装应确保在导电部分及它们的绝缘上不会堆积灰尘和水气。

(9) 灯具的导电部分应与外壳或内部附件绝缘。

(10) 灯具所有的金属部分应能导电并具有合适的接地端子，并满足 GB 7000.1 要求。

(11) 灯具的供电电缆接线端子的温升应不超过 40℃。

(12) 灯具易被触及的部位表面温度应不超过 60℃。

(13) 灯具内部连接的电线应具有符合灯具内最大温度的温度级。

- (14) 荧光照明灯具的外壳防护等级至少应为 IP20。
- (15) 管状荧光灯的灯座型式应满足表 2.3-4 要求。
- (16) 管状荧光灯的灯座电压及负载应不超过表 2.3-4 的规定。

表 2.3-4 荧光灯电压与负载

灯座型式	电压 (V)	负荷 (W)
G13	250	80
G5	250	13

- (17) 与灯具分开安装的所有独立的镇流器、电容器和其他附件，均应安装在接地的金属盒中。
- (18) 如荧光灯具内部安装有等于和大于 0.5μF 的电容器，应设有当电源一断开就迅速放电的措施。
- (19) 荧光照明灯具的冷态绝缘电阻应不小于 100MΩ；湿热试验后，热态绝缘电阻应不小于 10MΩ。

5.3 选型要点

- 在船舶上安装、使用的荧光照明灯具应按规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 5.2 条要求。
- (1) 可根据灯具安装场所和位置选择适当的外壳防护等级。
 - (2) 可根据灯具生产厂商提供的灯具配光曲线图，按照明的实际需要选择灯具的型式和功率。
 - (3) 除非特别需要，应尽可能选择能固定安装的灯具。

6 船用白炽照明灯

6.1 范围

本节适用于在船舶上安装使用的电源电压不超过 250V 的以白炽灯为光源的照明灯具。

6.2 技术要求

- (1) 白炽照明灯具应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。
- (2) 白炽照明灯具一般应是经“CCC”认可的安全型式。
- (3) 白炽照明灯具应由不燃的且耐腐蚀的材料制成。
- (4) 灯座应以滞燃的和不吸潮的材料制成。所有金属部件的结构应牢固，E40 型灯座应有把灯泡锁牢在灯座上的措施。
- (5) 灯具应便于拆装、升降和更换零件，并能防止灯泡松动和脱出。
- (6) 灯具的外壳防护等级应至少为 IP20。试验方法见 GB 7000.1。
- (7) 灯具内部不应有粗糙的突出物、尖角和突然的弯曲，并使绝缘导体具有足够大的通道。所有电缆的输出口应有圆滑的边或加了合适的衬套，且应确保导体对接线端子不会产生压力。
- (8) 灯具应有足够的散热结构。
- (9) 灯具的设计及安装应确保在导电部分及它们的绝缘上不会堆积灰尘和水气。
- (10) 灯具的导电部分应与外壳或内部附件绝缘。
- (11) 灯具所有的金属部分应能导电并具有合适的接地端子，并满足 GB 7000.1 要求。
- (12) 灯具的供电电缆接线端子的温升应不超过 40℃。

- (13) 灯具易被触及的部位表面温度应不超过 60℃。
- (14) 灯具内部连接的电线应具有符合灯具内最大温度的温度级。
- (15) 白炽照明灯具的灯座型式应满足表 2.3-5 要求。
- (16) 白炽照明灯具的灯座电压和负载应不超过表 2.3-5 要求。

表 2.3-5 白炽灯电压与负载

灯座型式		电压 (V)	负 荷
插口式	B22	250	200W/4A
	B15d	250	15W/2A
	B15s	55	15W/2A
螺旋式	E40	250	3000W/16A
	E27	250	200W/4A
	E14	250	15W/2A

- (17) 灯具的冷态绝缘电阻应不小于 100MΩ；湿热试验后，热态绝缘电阻应不小于 10MΩ。

6.3 选型要点

- (1) 在船舶上安装、使用的白炽照明灯具应按船级社规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 6.2 条要求。
- (2) 可根据灯具生产厂商提供的灯具配光曲线图，按照明的实际需要选择灯具的型式和功率。
- (3) 除非特别需要，应尽可能选择能固定安装的灯具。

7 船用防爆照明灯

7.1 范围

本节适用于在船舶可能出现爆炸气体、蒸气而有爆炸危险的处所内安装使用的电源电压不超过 250V 的白炽照明灯具、荧光照明灯具、投光灯具及各种便携式照明灯具。

7.2 技术要求

- (1) 船用防爆照明灯具应满足本章第 5、6 节要求。
- (2) 船用防爆照明灯具除应满足本章第 5、6 节要求外，还应满足 GB 3836 相关要求，并具有 CCS 认可的防爆主管试验机构核发的防爆合格证。

7.3 选型要点

- (1) 在船舶上安装、使用的白炽照明灯具应按船级社规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 6.2 条要求。
- (2) 船上通常使用下列几种类型的合格防爆电气设备：
 - 1) 本质安全型 Ex “i”。
 - 2) 隔爆型 Ex “d”。
 - 3) 增安型 Ex “e”。
 - 4) 正压型 Ex “p”。
 - 5) 特殊型 Ex “s”。
 - 6) 充砂型 Ex “q”。
 - 7) 浇封型 Ex “m”。
- (3) 在油漆间（包括其通风管道）可安装上款 1) ~5) 所列合格防爆照明灯具，其余处所可安装上款所列合格防爆照明灯具，且其防爆类别和温度组别应不低于表 2.3-6 的规定。

表 2.3-6 防爆类别与温度组别

处所	类别①	温度组别①
蓄电池室	Ⅱ C②	T1
油漆间	Ⅱ B	T3
油灯间	Ⅱ A	T3
氨装置室	Ⅱ A	T1
乙炔储藏室	Ⅱ C	T2
危险货物舱	按载运危险货物的类别	按载运危险货物的类别
60℃及 60℃以下闪点的油管道隧	Ⅱ A	T3

① 本表和本章节所列防爆电气设备的类别及温度组别，均采用 IEC 60079 出版物《爆炸性气体环境中使用的电气设备》或 GB 3836《爆炸性环境用电气设备》的有关规定。

② 本表和本章节所列防爆电气设备类别Ⅱ A、Ⅱ B、Ⅱ C 仅适用于隔爆型电气设备及本质安全型电路和电气设备，如采用其他类型防爆电气设备，则应采用Ⅱ类设备。

(4) 在开敞甲板上距油漆间进气和排气通风口 1m 或距机械通风排气出口 3m 范围内，可安装本节 7.3 (2) 所列的防爆照明灯具或具有简单的正压外壳或防蒸汽外壳（防护等级至少为 IP55），并且其表面不会达到不允许高温的照明灯具。

(5) 在有爆炸性粉尘沉积的处所中，如需要安装防爆照明灯具，则这些电气设备应符合下列要求：

- 1) 外壳防护等级至少为 IP55。
- 2) 在连续工作情况下，其最高表面温度，应至少比 5mm 厚该类粉尘层的引燃温度低 75K。

8 船用消防应急灯

8.1 范围

(1) 本节适用于在船舶火灾条件下使用的应急照明灯具、标志灯具和照明标志灯具。

(2) 消防应急灯具按应急供电形式分为自带电源型、集中电源型和子母电源型；按用途分为标志灯、照明灯和照明标志灯；按工作方式分为持续型和非持续型；按应急实现方式分为独立型、集中控制型和子母控制型。

8.2 技术要求

(1) 消防应急灯具应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。

(2) 在消防应急灯具的适当位置应清晰的标明：灯具类型、型号、额定电压、光源型号规格、光源功率、照度（或光通量）、使用环境、电池型号和其应急工作时间极限（自带电源型适用）、生产日期等。就此标志应耐久，且在灯具被安装完毕后能被方便、清晰地看到。

(3) 消防应急灯具的外壳，包括透明件，应有足够的机械强度。应按 GB 7000.1 第 4.13 款进行必要的试验时，最小冲击能量应为 0.35N·m。

(4) 消防应急灯具应设计成其光源便于更换。

(5) 消防应急灯具应设接地端子，且接地标志清晰、耐久。

(6) 消防应急灯具的电池充、放电回路间及主电输入回路应有熔断器或断路器保护。熔断器的额定电流值应清晰标示。

(7) 消防应急灯具如使用荧光照明灯管，在应急状态下启动时不得使用 IEC 60155 规定的启辉器。

(8) 消防应急灯具的主要部件应采用符合国家标准定型产品。直流电子镇流器应满足 IEC 60924、IEC 60925 要求。

(8) 消防应急灯具的外壳应采用不燃材料制成。内部连线宜采用耐高温电线，且接线牢固。消防应急灯具的外壳防护等级至少应为 IP22。如灯具安装在船舶局部水基灭火系统范围内或其他有浸水可能的场所时，其外壳防护等级至少为 IP44。

(10) 环境温度为 (25±3)℃ 条件下，消防应急灯具的内置变压器、镇流器等发热元件的表面最高温度应不超过 90℃。其电池周围的温度应不超过 50℃。集中电源型消防应急灯具在使用免维护铅酸电池时，电池周围温度应不超过 30℃。

(11) 有语音功能的消防应急灯具其音量调节装置应置于内部。正前方 1m 处测得的声压级应在 70~115dB (A) 范围内，且清晰可辨。

(12) 标志灯文字笔画宽度应不小于 10mm，且分辨清晰；辅助文字的笔画宽度或自行设计；图形标志的分辨率变应参照执行；标志灯文字不宜单独采用汉字以外的其他文字（楼层显示标志灯除外）。其图形、文字应满足 ISO6309、IMO. 952 (23)、IMO. 760 (18) 的规定。

(13) 自带电源型和子母电源型消防应急灯具不应采用铅酸电池或其他非密封电池。电池的工作寿命应不小于 4 年。

(14) 消防应急灯具的应急转换时间应不大于 5s，高风险区域使用的消防应急灯具的应急转换时间不大于 0.25s。

(15) 消防应急灯具的应急工作时间应不小于 90min，且不小于灯具本身标称的应急工作时间。

(16) 标志灯标志的颜色应为绿色、红色、白色与绿色组合、白色与红色组合四种之一。其表面亮度应满足：

仅用绿色或红色图形、文字构成标志的标志灯表面最小亮度应不小于 15cd/m²，最大亮度应不大于 300cd/m²。且最大亮度与最小亮度的比值应不大于 10。

用白色和绿色组合或白色和红色组合构成的图形、文字作为标志的标志灯表面最小亮度应不小于 3cd/m²，最大亮度应不大于 300cd/m²。且最大亮度与最小亮度的比值应不大于 10。白色与相邻绿色或红色交界两边对应点的亮度比应不小于 5 且不大于 15。

(17) 照明灯从主电源转换到应急电源供电时，其光通量应不低于光源在额定电压时光通量的 70%。

(18) 照明标志灯应同时满足“标志灯”和“照明灯”的要求。

(19) 使用荧光灯为光源的消防应急灯具不应将启辉器接入应急回路。

(20) 自带电源型和子母电源型消防应急灯具的应急状态不应受其主电供电线路短路、接地的影响。

(21) 非集中供电型消防应急灯具应设模拟主电源供电故障的自复式试验按钮（或开关），不应设影响应急功能的开关。

(22) 自带电源型和子母电源型的消防应急灯具应设主电、充电、故障状态指示灯。主电状态用绿色，充电状态用红色，故障状态用黄色。集中电源型消防应急灯具应设主电和应急电源状态指示灯，主电状态用绿色，应急状态用红色。主电和应急电源共用线路的消防应急灯具可只用红色指

示灯。

(23) 消防应急灯具在处于未接入光源、光源不能正常工作或光源规格不符合要求等异常状态时,内部元件表面最高温度不应超过 90°C ,且不影响电池的正常充电。光源回复后,消防应急灯具应能正常工作。

(24) 对于子母电源型消防应急灯具,子母消防应急灯具之间连接线的线路压降应不超过母消防应急灯具输出端电压的 3%。

(25) 对于有语音提示的消防应急灯具,其语言宜用“这里是安全(紧急)出口”、“禁止入内”等。

(26) 对于闪亮式标志灯,其闪亮频率应为 $(1 \pm 10\%) \text{ Hz}$,点亮与非点亮时间比为 4:1。

(27) 对于顺序闪亮并形成导向光流的标志灯,其顺序闪亮频率应在 $2 \sim 32 \text{ Hz}$ 范围内,但设定后的频率变动不应超过设定值的 $\pm 10\%$ 。

(28) 消防应急灯具应有过充电保护和充电回路短路保护。充电回路短路时,其内部元件表面温度不应超过 90°C 。重新安装电池后,消防应急灯具应能正常工作。消防应急灯的充电时间应不大于 24h,最大连续过充电电流应不超过 $0.05C_{50} \text{ A}$ 。集中电源型消防应急灯具使用免维护铅酸电池最大充电电流应不大于 $0.4C_{20} \text{ A}$ 。

(29) 消防应急灯具应有过放电保护。电池放电终止电压应不小于额定电压的 80%,放电终止后,在未重新充电条件下,即使电池电压恢复,消防应急灯具也不应重新启动,且静态泄放电流应不大于 $10^{-5}C_{50} \text{ A}$ 。集中电源型消防应急灯具使用免维护铅酸电池最大放电电流应不大于 $0.6C_{20} \text{ A}$ 。电池放电终止电压应不小于额定电压的 90%,静态泄放电流应不大于 $10^{-5}C_{20} \text{ A}$ 。

(30) 消防应急灯具应能连续完成至少 50 次“主电状态 1min→应急状态 20s→主电状态 1min”的工作状态循环。

(31) 消防应急灯具在主电电压为 $176 \sim 264 \text{ V}$ 范围内,不应转入应急状态。

(32) 消防应急灯具由主电状态转入应急状态时的主电电压应在 $132 \sim 176 \text{ V}$ 范围内。由应急状态回复到主电状态时的主电电压应不大于 176 V 。

(33) 消防应急灯具应完成 10 次“完全充电→放电终止→完全充电”。循环的充电、放电过程。末次放电时间应不低于首次放电时间的 85%,并满足“消防应急灯具的应急转换时间应不大于 5s,高危险区域使用的消防应急灯具的应急转换时间不大于 0.25s”。

(34) 消防应急灯具的主电源输入端与壳体之间的绝缘电阻应不小于 $50 \text{ M}\Omega$ 。

(35) 集中控制型消防应急灯具的控制器还应满足以下要求:

1) 控制器应能控制并显示与其相连的所有消防应急灯具的工作状态,并显示应急启动时间。

2) 控制器应能防止非专业人员操作。

3) 控制器在与其相连的消防应急灯具之间的连接线开路、短路(短路时消防应急灯具转入应急状态除外)时,应能发出声、光故障报警信号,并指示故障部位。声报警信号应能手动消除,且不妨碍声报警被再次启动。光报警信号在故障被排除前应保持。

4) 控制器应有主、备用电源的工作状态的指示,并能实现主、备用电源的自动转换。且备用电源应能保持控制器正常工作 2h。

5) 控制器在主电源欠电压、控制器备用电源的充电器

与备用电源之间的连接线开路或短路、控制器与为其供电的备用电源之间的连接线开路或短路等情况下应发出声、光报警信号,并指示故障类型。声报警信号应能手动消除,且不妨碍声报警被再次启动。光报警信号在故障被排除前应保持。故障期间,消防应急灯具应转入应急状态。

6) 当控制器控制集中电源型消防应急灯具时,控制器应能控制并显示应急电源的工作状态(主电、充电、故障状态、电池电压、输出电压和输出电流),且在与应急电源之间连接线开路或短路时,发出声、光报警信号。

7) 控制器应能对本机及面板上所有指示灯、显示器、音响器进行功能检查。

8) 控制器应能以手动、自动两种方式使与其相连的所有消防应急灯具转入应急状态,且应设强制使所有消防应急灯具转入应急状态的按钮。该按钮启动后,应急电源应不受过放电保护的影响。

9) 当某一支路的消防应急灯具与控制器连接线开路、短路或接地时,应不影响其他支路的消防应急灯具和应急电源的工作。

10) 控制器应能显示各消防应急灯具光源点亮与非点亮状态。

(36) 集中电源型消防应急灯具的应急电源还应满足以下要求:

1) 应急电源应显示主电电压、电池电压、输出电压和输出电流,并应设主电、充电、故障和应急状态指示灯。主电状态用绿色、故障状态用黄色、充电状态和应急状态用红色。

2) 应保证主电和备用电不能同时输出,产能以手动、自动两种方式转入应急状态,且应设只有专业人员可操作的强制应急启动按钮。该按钮启动后,应急电源应不受过放电保护的影响。

3) 每个供电支路均应单独保护,且任一支路故障不应影响其他支路的正常工作。

4) 应能在空载、满载 10% 和超载 20% 条件下正常工作。

5) 当串接电池组额定电压大于或等于 12 V 时,应对电池(组)分段保护。每段电池(组)额定电压应不大于 12 V ,且在电池(组)充满电时,每段电池(组)电压均应不小于额定电压。

6) 应急电源在充电器与电池之间连接线开路或短路、应急输出主线路及支路连接线开路或短路、应急控制回路开路或短路、应急状态下电池电压低于过放电保护电压值等情况下应发出声、光报警信号,并指示故障类型。声报警信号应能被手动消除,且不妨碍声报警被再次启动。光报警信号在故障被排除前应保持。

(37) 防爆消防应急照明灯具除了应满足以上要求外,还应满足 GB 3836 系列标准要求,并取得 CCS 认可的防爆主管试验机构核发的防爆合格证。

8.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的消防应急灯具应按船级社规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 8.2 条要求。

(2) 应根据需要照明的场所环境和空间大小选择消防应急照明灯具的型号、规格。

(3) 在可能有爆炸危险气体存在的场所应选用具有防爆合格证的产品。

9 手提式船用水密搜索灯(救生艇用)

9.1 范围

本节适用于在救助艇和救生艇上用于搜索、照明的手提式水密搜索灯或探照灯(Searchlight)。

9.2 技术要求

(1) 手提式水密搜索灯(探照灯)应能在救助艇和救生艇上使用。

(2) 手提式水密搜索灯(探照灯)应清晰、耐久地标志出制造厂名、额定电压、光源功率、生产日期等信息。

(3) 发光体上应清晰、耐久地标明额定电压和功率。

(4) 如需要,水密搜索灯(探照灯)应有电气短路保护以避免损坏或伤害。

(5) 如需要,应提供电池充电设备。

(6) 手提式水密搜索灯(探照灯)应避免使用螺口灯座,并应将发光体安全地装入水密搜索灯(探照灯)。

(7) 手提式水密搜索灯(探照灯)应设计成即使在黑暗中也能容易地更换发光体。

(8) 手提式水密搜索灯(探照灯)的所有零件应由非磁性材料制成。

(9) 手提式水密搜索灯(探照灯)的结构应能避免冷凝水的聚集达到危险的程度。

(10) 手提式水密搜索灯(探照灯)的安全事项,应满足 IMO A.694 (17) 和 IEC 60945 的有关要求。

(11) 手提式水密搜索灯(探照灯)应在 12V 或 24V 电压下工作。

(12) 手提式水密搜索灯(探照灯)应能用手容易地操作。其外部零件及操作部件在工作时的最高温度应不超过 60℃。

(13) 手提式水密搜索灯(探照灯)应能在 -30℃ ~ +65℃ 的空气温度范围内存放而不致损坏。

(14) 手提式水密搜索灯(探照灯)应能在 -1℃ ~ +30℃ 的海水温度范围内可用。

(15) 手提式水密搜索灯(探照灯)应能先经受 IEC 60945 第 8.2 款所述的干热试验、然后再进行 IEC 60945 第 8.3 款所述的湿热试验、第 8.4 款所述的低温试验和第 8.5 款所述的热冲击试验。试验完毕后,手提式水密搜索灯应不失刚性、无皱缩、无开裂、无胀大、无溶解、无机械性的改变,并能工作。

(16) 经过温度试验的手提式水密搜索灯(探照灯)应按 IEC 60945 第 8.7 款要求进行振动试验。

(17) 经过振动试验的手提式水密搜索灯(探照灯)应按 IEC 60945 第 8.12 款适用部分要求进行腐蚀试验,然后按 IEC 60945 第 8.8 款要求进行雨淋试验。试验后手提式水密搜索灯(探照灯)应无损坏迹象并能工作。

(18) 经过腐蚀和雨淋试验后,手提式水密搜索灯(探照灯)的发光强度应至少为 2.5×10^3 cd。其轴线上的发光强度应至少为最大光强的 90%。手提式水密搜索灯(探照灯)的发光强度应在光分布的中心达到最大,并保证光强分布的均匀性。手提式水密搜索灯(探照灯)的水平和垂直扇面至少为 6°。

(19) 手提式水密搜索灯(探照灯)应能连续工作 3h。

在此期间,应满足上款要求。

9.3 选型要点

手提式水密搜索灯(探照灯)应获得船级社的型式认可证书方可在救助艇或救生艇上使用。

10 其他灯具(手提灯、海图灯)

10.1 范围

本节适用于在船舶上使用的以白炽灯为光源的海图灯、手提工作灯等灯具。

10.2 技术要求

(1) 灯具应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。

(2) 灯具应由不燃的且耐腐蚀的材料制成。

(3) 灯座应以滞燃的和不吸潮的材料制成。所有金属部件的结构应牢固,E40 型灯座应有把灯泡锁牢在灯座上的措施。

(4) 灯具应便于拆装、升降和更换零件,并能防止灯泡松动和脱出。

(5) 灯具的外壳防护等级应至少为 IP20。试验方法见 GB 7000.1。

(6) 灯具内部不应有粗糙的突出物、尖角和突然的弯曲,并使绝缘导体具有足够大的通道。所有电缆的输出口应有圆滑的边或加了合适的衬套,且应确保导体对接线端子不会产生压力。

(7) 灯具应有足够的散热结构。

(8) 灯具的设计及安装应确保在导电部分及它们的绝缘上不会堆积灰尘和水气。

(9) 灯具的导电部分应与外壳或内部附件绝缘。

(10) 灯具所有的金属部分应能导电并具有合适的接地端子,并满足 GB 7000.1 要求。

(11) 灯具的供电电缆接线端子的温升应不超过 40℃。

(12) 灯具易被触及的部位表面温度应不超过 60℃。

(13) 灯具内部连接的电线应具有符合灯具内最大温度的温度级。

(14) 海图灯应能被可靠固定。

(15) 海图灯在旋转半径不大于 800mm 的活动范围内,变位操作应灵活,并能固定于任意位置。

(16) 海图灯在距离被照明面 300mm 处,被照明面的照度应不小于 150lx。

(17) 海图灯应装有调光装置,并必须避免眩光。

(18) 手提灯的面罩玻璃应加保护网罩。

(19) 手提灯应有把手和吊钩,其结构应采用双重绝缘。

(20) 手提灯应能承受自 500mm 高度落在 6mm 以上厚度的钢板上的跌落试验后仍能正常工作。

(21) 手提灯的电线应可靠固定在灯上并有适当的装置确保外力不能直接加在接线端子上。

10.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的工作灯具应按船级社规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 10.2 条要求。

(2) 可根据灯具生产厂商提供的灯具配光曲线图,按室内照明的实际需要选择灯具的型式和功率。

第 4 章 船用日用电器

1 电取暖器

1.1 范围

本节适用于在船舶上使用的由电热元件作为热源的取暖设备，包括：电取暖器、暖风机等等。

1.2 技术要求

- (1) 电取暖器应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。
- (2) 电取暖器的加热元件应有结构坚固的防护装置。防护装置的开孔应足够狭窄，以防止杂物落入。
- (3) 电取暖器在结构上应保证其在正常工作状态下电源端头所达到的温度不超过电源电缆的导体最高工作温度。
- (4) 电取暖器的所有内部连接线应以不燃材料作连续的绝缘。
- (5) 电热元件之间的连接不应用锡焊。
- (6) 电取暖器的热态绝缘电阻应不低于 0.5MΩ。
- (7) 电取暖器在使用时必须用手握持的部分，其温度应不超过表 2.4-1 的规定值。

表 2.4-1 可手握持部分的最高温度

把手、手柄及类似部件的材料	正常情况下可直接用于持握的最高温度 (℃)	
	长时	短时
金属	55	60
瓷器、玻璃、模压材料、橡胶或木材	65	70

- (8) 安装在厨房或浴室内的电取暖器及其控制设备，其外壳防护等级至少为 IP44。它们的外壳应是由不燃的且耐腐蚀材料制成，并有 1 个或几个排水孔。
- (9) 电取暖器的结构、防护和安装，应考虑到当衣服、寝具或其他易燃物质与之接触时不会导致引起火灾的危险，其外壳顶部的结构应使易燃物质不可能在其上面搁置。
- (10) 电取暖器应有一个保护装置，当电取暖器的温度超过允许极限时，该装置应能切断其电源。

1.3 选型要点

- (1) 在船舶上安装、使用的电取暖器应按船级社规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 1.2 条要求。
- (2) 应根据电取暖器的型式、功率及其在工作时单位时间内产生的热能，结合舱室空间的体积选择电取暖器。
- (3) 电取暖器应固定安装船舱内适当的位置。当电取暖器被安装在浴室和厨房内时，应尽可能地远离可能被水冲溅到的位置。

2 电炊具

2.1 范围

本节适用于在船舶上使用的由电热元件作为热源的炊事

设备，包括：电灶、电煎锅、电烘箱等等。

2.2 技术要求

- (1) 电炊具应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。
- (2) 电炊具的加热元件应有结构坚固的防护装置。防护装置的开孔应足够狭窄，以防止杂物落入。
- (3) 电炊具在结构上应保证其在正常工作状态下电源端头所达到的温度不超过电源电缆的导体最高工作温度。
- (4) 电炊具的所有内部连接线应以不燃材料作连续的绝缘。
- (5) 电炊具的电热元件之间的连接不应用锡焊。电炊具在使用时，必需用手握持的部分，其温度应不超过表 2.4-1 的规定。
- (6) 电炊具及其控制设备，其外壳防护等级至少为 IP44。它们的外壳应是由不燃的且耐腐蚀的材料制成，并有 1 个或几个排水孔。
- (7) 电炊具的结构应保证当有液体或食品溢出时，不致损坏绝缘和发生短路。
- (8) 电炊具的冷态绝缘电阻应不小于 10MΩ。
- (9) 电炊具的热态绝缘电阻应不小于 1MΩ。热态绝缘电阻指其在额定工作温度下（锅内水沸腾、烘炉达 350℃）正常工作时，在断电后 1min 内用输出电压为 500V（DC）的兆欧表测得的绝缘电阻值。
- (10) 电炊具的结构上应设计成能尽可能避免因船舶摇摆导致容器内沸水等高温液体被泼溅出来。

2.3 选型要点

- (1) 在船舶上安装、使用的电炊具应按规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 2.2 条要求。
- (2) 应根据船舶配置的船员数量选择适当功率和容积的电炊具。
- (3) 电炊具的发热部分应固定安装在船舶厨房的适当位置。

3 电热水器

3.1 范围

本节适用于在船舶上使用的由电热元件作为热源的水加热设备。

3.2 技术要求

- (1) 电热水器应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。
- (2) 电热水器的加热元件应有结构坚固的防护装置。防护装置的开孔应足够狭窄，以防止杂物落入。
- (3) 电热水器在结构上应保证其在正常工作状态下电源端头所达到的温度不超过电源电缆的导体最高工作温度。
- (4) 电热水器的所有内部连接线应以不燃材料作连续的

绝缘。

(5) 电热水器的电热元件之间的连接不应用锡焊。

(6) 安装在厨房的电热水器及其控制设备,其外壳防护等级至少为 IP44。它们的外壳应是由不燃的且耐腐蚀的材料制成,并有 1 个或几个排水孔。

(7) 电热水器的水容器应无渗水现象,且其结构应保证当船舶摇摆时,容器内的水不会被泼溅出来。

(8) 当发生意外溢水时,电热水器不应损坏绝缘和发生短路。

(9) 应有一个保护装置,使电热水器的水容器内的水位不低于额定容量的 50%,不高于上限水位。当液面上升至上限水位时,该装置应关闭进水阀;当容器内水量低于额定容量的 50%时,该装置应自动切断加热电源,或电热水器不能被起动。

(10) 电热水器正常工作时,其热态泄漏电流应不大于 1mA/kW。

(11) 电热水器的冷态绝缘电阻应不小于 10MΩ。

3.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的电热水器应按规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 3.2 条要求。

(2) 应尽量选择能在船上固定安装的电热水器。

4 电风扇

4.1 范围

本节适用于在船舶上使用的电风扇设备。

4.2 技术要求

(1) 电风扇应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。

(2) 电风扇应由不燃且耐腐蚀的材料制成。电风扇的金属部件应有适当的防腐措施(如电镀、喷塑、喷漆、或采用不锈钢等)。

(3) 电风扇的翼片应牢固可靠、平衡良好,在运转时不应有明显的振动。

(4) 电风扇在额定工况下运转时,其扇翼最大圆周上的最大线速度应不大于 2150m/min。

(5) 台式、壁式电风扇的旋转翼片应有网罩保护。网罩的网孔直径(或最宽处)应不大于 8mm。

(6) 台式、壁式电风扇的摇头和俯仰机构应能使电风扇的风向自动连续变化,且动作平稳,不应有阻滞和振颤现象。

(7) 电风扇的调速机构应能确保电风扇旋转翼片的转速可调,且运转可靠、换档灵活。两个不同的转速档不应同时被锁住。

(8) 电风扇在额定工况下,在最高转速时,距其 1m 处测得的噪声应不大于 70dB(A)。

4.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的电风扇应按规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 4.2 条要求。

(2) 台式、壁式电风扇的底座应能被可靠固定。

(3) 顶式电风扇应能被可靠固定的舱顶。安装完成后,旋转翼片到地面的距离应不小于 2m。不推荐在船舶上安装、使用顶式电风扇。

5 电冰箱

5.1 范围

本节适用于在船舶上使用的电冰箱、电冰库、冷库等设备。

5.2 技术要求

(1) 电冰箱应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。

(2) 电冰箱的制冷能力、绝热能力和密封能力应不低于陆用电冰箱的要求。

(3) 电冰箱应由不燃且耐腐蚀的材料制成。电冰箱的金属部件应采用不锈钢等,或有适当的防腐措施(如电镀、喷塑、喷漆)。

(4) 电冰箱应有固定安装用的底座,并有适当的减振装置。安装底座应有足够的强度,在电冰箱装入规定数量的物品时能够承受船舶正常营运时产生的倾斜、摇摆和振动。当电冰箱的高度超过 2 倍长度或宽度时,应考虑在电冰箱的上部设置固定装置,供其与船舶舱壁可靠固定。

(5) 电冰箱的搁物架应在箱内固定。搁物架应设有固定物品的装置,确保在船舶倾斜、摇摆和振动的情况下,箱内的物品不致撞击箱壁和门。箱门在装载规定重量的物品时,不应在船舶倾斜、摇摆和振动的状况下自行开启。

(6) 当电冰箱(冷库)的容积较大,能够容纳人员进入时,在其内部应设有呼叫(警铃)按钮,确保当人员误被关入时有效呼救。

(7) 电冰箱应设有 M6 或以上的铜质接地螺钉,其附近应有明显、耐久的接地标志。接地螺钉的接地阻值应不大于 1Ω。

(8) 电冰箱应设有防触电保护装置(I 类电器)。

(9) 电冰箱的冷态绝缘电阻应不小于 100MΩ;湿热试验后,热态绝缘电阻应不小于 10MΩ。

(10) 电冰箱的外壳防护等级应至少为 IP22。安装在厨房、餐厅的电冰箱外壳防护等级应为 IP44。

(11) 电冰箱的电源插头、插座应有足够的容量,其额定电流应不小于电冰箱额定电流的 2 倍。电源插头、插座的防护等级应与电冰箱的外壳防护等级相匹配。

(12) 电冰箱应设有适当的防凝露措施,并有收集、排除及处理化霜水的措施。冷凝水和化霜水不应在船舶倾斜、摇摆时外溢。

(13) 制冷系统的管系应为铜质,绝热层中不得有中间接头。

(14) 电冰箱的制冷剂建议为无氟、无毒材料。

(15) 电冰箱的制冷系统应密封良好。制冷剂的年泄漏量应不大于 0.5g。

(16) 电冰箱的任何室或间隔,当其容积不小于 60L 时,在门未被锁住时,应能被从内部打开。门的开启力应不大于 70N。

(17) 电冰箱正常运行时的噪声应不大于 55dB(A)。

5.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的电冰箱应按规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 5.2 条要求。

(2) 可根据船舶核载人员及航线要求选择适当容积的电冰箱。

(3) 当船舶电站的容量较小时, 还应适当考虑电冰箱的功率不应过大。

6 日用灯具

6.1 范围

本节适用于在船舶上使用的台灯、壁灯等日常生活起居照明用的灯具。

6.2 技术要求

- (1) 日用灯具应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。
- (2) 日用灯具的光源一般为白炽灯、管状荧光灯、U 型节能灯等。
- (3) 日用灯具一般应是经“CCC”认可的安全型式。
- (4) 日用灯具应尽可能被设计成能被固定在舱壁或写字台上的型式, 或底座上带有固定夹以便于被固定。
- (5) 日用灯具应由不燃的且耐腐蚀的材料制成。
- (6) 灯具应便于拆装、升降和更换零件, 并能防止灯泡松动和脱出。
- (7) 灯具的外壳防护等级应至少为 IP20。试验方法见 GB 7000.1。
- (8) 灯具内部不应有粗糙的突出物、尖角和突然的弯曲, 并使绝缘导体具有足够大的通道。所有电缆的输出口应有圆滑的边或加了合适的衬套, 且应确保导体对接线端子不会产生压力。
- (9) 灯具应有足够的散热结构。
- (10) 灯具的设计及安装应确保在导电部分及它们的绝缘上不会堆积灰尘和水气。
- (11) 灯具的导电部分应与外壳或内部附件绝缘。
- (12) 灯具所有的金属部分应能导电并具有合适的接地端子, 并满足 GB 7000.1 要求。
- (13) 灯具的供电电缆接线端子的温升应不超过 40℃。
- (14) 灯具内部连接的电线应具有符合灯具内最大温度的温度级。
- (15) 灯座应以滞燃的和不吸潮的材料制成。所有金属部件的结构应牢固, E40 型灯座应有把灯泡锁牢在灯座上的措施。
- (16) 钨丝灯的灯座型式应满足表 2.4-2 要求。
- (17) 钨丝灯的灯座电压和负载应不超过表 2.4-2 要求。

表 2.4-2 钨丝灯电压与负载

灯座型式		电压 (V)	负 荷
插口式	B22	250	200W/4A
	B15d	250	15W/2A
	B15s	55	15W/2A
螺旋式	E40	250	3000W/16A
	E27	250	200W/4A
	E14	250	15W/2A

- (18) 管状荧光灯的灯座型式应满足表 2.4-3 要求。
- (19) 管状荧光灯的灯座电压及负载应不超过表 2.4-3 的规定。

表 2.4-3 荧光灯电压与负载

灯座型式	电压 (V)	负荷 (W)
G13	250	80
G5	250	13

- (20) 与灯具分开安装的所有独立的镇流器、电容器和其他附件, 均应安装在接地的金属盒中。
- (21) 如荧光灯具内部安装有等于和大于 0.5μF 的电容器, 应设有当电源一断开就迅速放电的措施。
- (22) 具有变位结构的台灯, 其变位操作应方便, 并能固定在任意位置。
- (23) 灯具的冷态绝缘电阻应不小于 100MΩ; 湿热试验后, 热态绝缘电阻应不小于 10MΩ。
- (24) 可移式台灯置于与水平面成 20°倾角的斜面上, 不应移动或倾倒。
- (25) 台灯灯罩的遮光性能应满足人的眼睛在距被照面高度为 400mm、离光源中心水平距离为 600mm 处看不到灯丝。

6.3 选型要点

- (1) 在船舶上安装、使用的日用灯具应按船级社规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 6.2 条要求。
- (2) 可根据灯具生产厂商提供的灯具配光曲线图, 按室内照明的实际需要选择灯具的型式和功率。
- (3) 除非特别需要, 应尽可能选择能固定安装或容易被固定的日用灯具。

7 电动切面机

7.1 范围

本节适用于在船舶上使用的电动切面机、和面机等厨房电动设备。

7.2 技术要求

- (1) 电动切面机应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。
- (2) 电动切面机应能在船上固定安装, 必要时应能在设备的上部被固定。
- (3) 电动切面机应由不燃的、耐腐蚀的材料制成, 导电部件和可动工作部件应不易被触及, 并应设有能防止人手或其他人体部分被误卷入设备内部的防护设施。
- (4) 应设有 M6 或以上的铜质接地螺钉, 其附近应有明显、耐久的接地标志。接地螺钉的接地阻值应不大于 1Ω。
- (5) 电动切面机的冷态绝缘电阻应不小于 100MΩ; 湿热试验后, 热态绝缘电阻应不小于 10MΩ。
- (6) 电动切面机与食物接触的部件应采用食品级或医用级的不锈钢材料或其他无毒副作用的同等级材料制成。
- (7) 电动切面机应设有在紧急状况下切断电源的红色自锁按钮, 并设有明显、耐久的警示标志。
- (8) 电动切面机的非导电部件应有可靠的接地措施。
- (9) 电动切面机的导电部分, 包括电动机、控制器、接线盒等, 其防护等级至少应达到 IP44。

7.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的电动切面机或其他电动厨房设备应按规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 7.2 条要求。

(2) 可根据船舶配载成员选配适当功率和容量的电动切面机或其他电动厨房设备。

8 烘干机

8.1 范围

本节适用于在船舶上使用的电能驱动滚筒自动顺逆运转的用蒸汽或电加热空气进行烘干的设备。

8.2 技术要求

(1) 烘干机应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。

(2) 烘干机的滚筒运转时应平稳, 不应有擦碰、异常响声和剧烈振动等现象。

(3) 滚筒顺逆转时, 动作应灵敏可靠。

(4) 烘干机正常工作时, 外表面温度应不大于 60°C 。

(5) 应设有 M6 或以上的铜质接地螺钉, 其附近应有明显、耐久的接地标志。接地螺钉的接地阻值应不大于 1Ω 。

(6) 烘干机的冷态绝缘电阻应不小于 $10\text{M}\Omega$; 湿热试验后, 热态绝缘电阻应不小于 $1\text{M}\Omega$ 。

(7) 烘干机在满负载条件下工作时, 噪声应不大于 $80\text{dB}(\text{A})$ 。

(8) 烘干机应设有当机内温度过高时切断电源的保护

装置。

8.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的电动切面机或其他电动厨房设备应按规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 8.2 条要求。

(2) 可根据船舶配载成员选配适当功率和容量的烘干机。

9 臭氧发生器

9.1 范围

本节适用于在船舶上使用的臭氧发生器。

9.2 技术要求

(1) 臭氧发生器应能在第 1 篇第 3 章所述的环境下可靠工作。

(2) 臭氧发生器应由不燃的、耐腐蚀的材料制成, 并能在船上固定安装。

(3) 臭氧发生器的冷态绝缘电阻应不小于 $10\text{M}\Omega$; 湿热试验后, 热态绝缘电阻应不小于 $1\text{M}\Omega$ 。

9.3 选型要点

(1) 在船舶上安装、使用的臭氧发生器应按规定要求进行检验和试验以验证其满足本节 9.2 条要求。

(2) 应根据船舶舱室需用要求选用臭氧发生器。

(3) 不推荐在船员生活舱室中, 或有人员工作的空间内使用臭氧发生器。

第 5 章 船 用 电 缆

1 概述

船用电缆是江河、海洋中各类船舶、海上石油平台及水上建筑物的电力、照明、控制、通信、微机系统等专用的电线电缆。国内外的电缆生产厂、船舶制造单位和使用部门对此类电缆均有特殊要求，必须严格满足联合国通过的《国际海上人命安全公约》(SOLAS) 的有关规定。因此各国都根据此公约制订了本国的船舶建造规范和海上石油平台建造规范，其中对船用电缆有严格的规定，并制定了船用电缆的国家标准。国际电工委员会 (IEC) 则有专门的技术委员会 (JC18 和 SC18A) 制订船用电缆的技术标准。而且，各国设有船舶检验部门 (船级社或船检局)，从事对船用电缆生产厂和船舶制造厂等实施《公约》、《规范》和《标准》的监督。

由于使用环境条件较严酷，则要求电缆安全可靠、寿命长、体积小、质量轻和价格低，并具有优良的耐温、耐火、阻燃、耐油、防潮、耐海水，优良的电气和机械性能等要求。

船用电缆按使用范围可分为船用电力电缆 (包括额定电压工频交流 1kV 及以下低压电力电缆和额定电压工频交流 3~15kV 中压电力电缆)、船用控制电缆、船用通信电缆、船用信号电缆和船用射频电缆。共一百多个型号和几千个规格。

随着航运和海上石油开发工业的发展，船用电缆将进一步研究开发新的产品，例如：中压电力电缆、耐火电缆、低烟低毒无卤电缆、纵向水密电缆、特种信号电缆，我国正在制订这些电缆的国家标准。

1.1 船用电缆选用原则

1.1.1 选择原则

海洋及内河船舶应选用船用电缆或满足船舶使用要求的电缆。

1.1.1.1 用于电力、照明、控制和通信系统的电缆选择

(1) 根据敷设舱室和区域的环境条件、使用场合以及工作状况，确定绝缘、护套、编织层材料及结构，选择电缆型号。若跨越多个舱室或区域，则应按条件最恶劣和要求最高的情况来选择电缆型号。

(2) 由实际工作电流、同期系数、工作制、环境温度、敷设情况和容许的电压降等确定导体截面积和导体数，并选择电缆型号和规格。

(3) 选择电缆程序见图 2.5-1。

1.1.1.2 船用射频电缆的选择 除了与上述电力电缆等的要求相同外，还需按照系统设备所规定的工作频率，对电缆的特性阻抗的匹配、传输功率的大小以及允许的衰减等加以选择。

1.1.2 电力电缆的选择

1.1.2.1 绝缘等级的选择

(1) 任何电缆的额定电压应不低于使用该电缆的电路之标称电压。对于由接触器操作的纹车等高电感电路中使用的

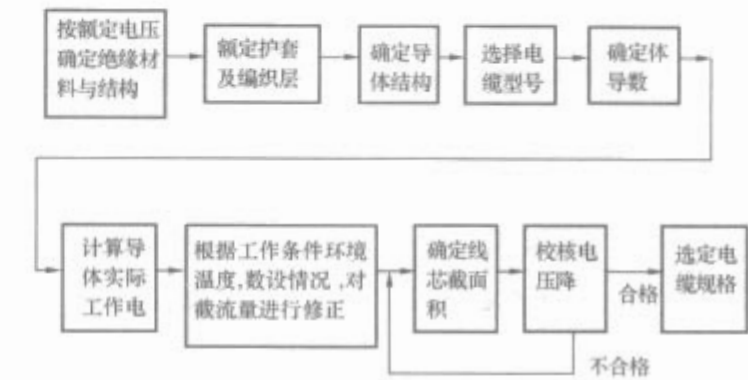


图 2.5-1 选择电缆程序框图

电缆需作特殊考虑。

(2) 电缆绝缘材料的长期允许工作温度应至少比电缆敷设场所可能存在或产生的最高环境温度高 10℃ 以上。目前船用电缆的绝缘材料名称，长期允许工作温度和短路温度见《电线电缆手册》第 1 册船用电缆部分。

1.1.2.2 保护层的选择

(1) 固定敷设在露天甲板、潮湿处所 (如浴室)、货舱、冷藏处所、机舱和通常有凝结水或有害气体 (如油气) 处所的电缆应有密封性护套 (例如氯磺化聚乙烯和氯丁橡胶等)。

(2) 在选择保护层时，应注意考虑电缆在敷设和使用中可能受到的机械作用。如果电缆保护层的机械强度不够，则应敷设在管子、管道、电缆槽中或采取有效防护措施。

(3) 用于交流电路的单芯电缆应为非铠装的或非磁性材料铠装，并采取特殊的安装工艺等措施。

1.1.2.3 导体截面积的确定

(1) 应从电路负荷变动的需要量、“同时工作系数”、“短路电流”、“电动机起动电流”等加上考虑环境因素等修正系数计算出导体截面积，选择其最大值作为电缆导体截面积。

(2) 在该电缆截面通过最大电流时，线路电压降应符合下节“电压降”中有关要求。

(3) 在敷设和工作条件下，导体应有足够的机械强度。电力电缆导体的最小截面积为 1mm²。

(4) 电气设备的接地导体截面积应符合表 2.5-1 的规定。

表 2.5-1 电气设备接地用铜导体的截面积 mm ²		
接地导体类型	相关的载流导体截面积 S	接地铜导体的最小截面积 Q
固定敷设电缆中的接地导体	≤16	Q=S 及 ≥1.5
	>16	Q≥S/2 及 Q≥16
单独固定的接地导体	≤2.5	对多根铜丝软线：Q=S 且 ≥1.5 对于单根铜线：Q=4
	>2.5~120	Q=S/2 且 ≥4
	>120	Q=70

1.1.2.4 电压降

(1) 电缆在正常工作状态下,通过最大电流条件下:配电板至系统任何一点电压降簇额定电压的6%;蓄电池供电时(电压不超过50V)电压降簇倾定电压的10%;航行灯线路电压降应使灯有足够的亮度与颜色。

(2) 短时特殊状态(如电动机起动)下,无数值要求,

只要设备能承受电压降的影响。

(3) 船内通信及电子设备等电压降,也可按电力系统采用的方法计算。不允许将多芯电缆的导体并联来获得较大载流量,但允许将导体并联来满足电压降的要求。

(4) 各种网络电压降的计算公式列于表2.5-2中。

表 2.5-2 电压降计算公式汇总

网络分类			以伏（V）表示		以百分数（%）表示	
			已知电流 （A）	已知功率（kW）	已知电流 （A）	已知功率 （kW）
基本公式	直流网络		$2IL/\gamma S$	$2PL/\gamma SU\times 10^3$	$2IL/\gamma SU\times 100$	$2PL/\gamma SU^2\times 10^5$
	单相交流网络		$2IL/\gamma S\cos\varphi$	$2PL/\gamma SU\times 10^3$	$2IL/\gamma SU\cos\varphi\times 100$	$2PL/\gamma SU^2\times 10^5$
	三相交流网络		$3IL/\gamma S\cos\varphi$	$PL/\gamma SU\times 10^3$	$3IL/\gamma SU\cos\varphi\times 100$	$PL/\gamma SU^2\times 10^5$
计算公式	直流网络	24V	$0.037IL/S$	$1.54PL/S$	$0.154IL/S$	$6.43PL/S$
		110V	$0.037IL/S$	$0.336PL/S$	$0.0336IL/S$	$0.306PL/S$
		220V	$0.037IL/S$	$0.168PL/S$	$0.0168IL/S$	$0.0765PL/S$
	单相交流网络	24V	$0.037IL/S\cos\varphi$	$1.54PL/S$	$0.154IL/S\cos\varphi$	$6.43PL/S$
		110V	$0.037IL/S\cos\varphi$	$0.336PL/S$	$0.0336IL/S\cos\varphi$	$0.306PL/S$
		220V	$0.037IL/S\cos\varphi$	$0.168PL/S$	$0.0168IL/S\cos\varphi$	$0.0765PL/S$
	三相交流网络		380V	$0.032IL/S\cos\varphi$	$0.0487PL/S$	$0.00844IL/S\cos\varphi$

注 表中计算式的符号的含义是: I—负载电流, A; S—线芯截面积, mm²; P—负载功率, kW; L—电缆长度, m; U—负载电压, V; cosφ—负载功率因数; γ—铜的电导率, γ=54 (m/Ω·mm²)。

1.1.2.5 电路的独立

要求采用独立的短路保护或过载保护的所有电路,除下面(1)和(2)条中所述的电路外,均应各自采用单独的电缆。

(1) 如果主电路和控制电路是用一公共隔离开关,则从主电路(如电动机电路)引出控制电路可与主电路公用同一电缆。

(2) 电压不超过“安全电压”的非重要电路。

1.2 船用电缆的安装与敷设

1.2.1 电缆敷设的准备工作

表 2.5-3 船舶电缆支承紧固件及贯通件

类别	序号	名称	分类	用途
电缆支承紧固件	1	电缆扎带	尼龙、金属、包塑金属扎带三种	用于以绑扎法紧固电缆
	2	电缆支架 (亦称电缆托架)	U形、I形、L形支架以及扁钢支架(B形)和重型支架(H形)	用扎带绑扎法紧固电缆到支架上,以支承电缆
	3	电缆紧钩	U形及积木式紧钩	用以支承并紧固电缆
	4	卡线板		用于以卡紧法紧固小束径电缆
	5	桥形板	焊接式及螺接式桥形板	用于以卡紧法固定电缆情况下作为支承电缆用
	6	电缆管道伸缩接头		供船体伸缩变形时,保护电缆管道
	7	电缆管道分线盒		供成束电缆穿管敷设中途分线之用
电缆贯通件	8	电缆框	腰圆形、圆形、长方形电缆框	供成束电缆穿过一般舱壁及舱体构件时,保护电缆兼保持船体构件强度之用
	9	电缆管	一般电缆管及水密电缆管	供单根电缆穿过舱壁甲板时,保护电缆,水密式电缆管供电缆穿过水密舱壁、甲板之用
	10	电缆筒	腰圆形及围壁式电缆筒	供成束电缆穿过一般甲板时,保护电缆兼保持甲板原有强度之用

续表

类别	序号	名 称	分 类	用 途
电缆 贯通 件	11	电缆尼龙衬套	圆锥形及凹槽形衬套	供单根电缆穿过木质等非金属舱壁之用
	12	电缆填料函	焊接式填料函及管式填料函	供单根电缆穿过水密舱壁时, 保护电缆兼保持舱壁水密性之用
	13	电缆填料盒	组合式橡胶块坡料盒 (MCT)、环氧树脂垫塞式填料盒, DMT-W 灌注式填料盒	供成束电缆穿过水密舱壁及甲板时, 保护电缆兼保持舱壁式甲板原有水密性之用
	14	电缆耐火填料盒	(1) 按耐火性能分为 A 级 (A—60、A—30、A—15、A—0) 及 B 级 (B—15、B—0) 两种 (2) 按密封性分为一般与水密两种 (3) 按电缆分为单根及成束两种 (4) 按所用填料可分为 DMT-W、DFD-Ⅱ 等多种	供电缆贯穿各级耐火分隔 (包括一般与水密的舱壁和甲板) 时, 保护贯穿处电缆兼保持分隔原有的耐火性能之用

1.2.2 电缆敷设的基本要求

- (1) 电缆敷设的线路应尽可能整齐平直和易于检修, 主干电缆暗式敷设路径上的封闭板, 以及电缆线路的分支接线暗式安装用的封闭板, 必须是便于开启的, 并标有耐久的标记。
- (2) 电缆敷设应防止机械损伤。
- (3) 电缆应尽量远离热源敷设, 电机组蒸汽管、排气管及管遭连接法兰、电阻器、锅炉等热源的空间距离, 平时时一般应不小于 100mm, 垂直时不小于 80mm, 否则应采取有效的隔热措施。电缆不应敷设在隔热或隔音绝缘层内。
- (4) 应尽量避免在有潮气凝结和油、水浸入处敷设电缆, 如果一定要在潮湿区域敷设, 一般规定电缆与潮湿壁的最小距离为 20mm; 进入潮气凝结、滴水场所要用电缆函, 并用填料密封, 进入油、水浸入区域要穿管敷设, 并用填料封端。
- (5) 应避免在易燃、易爆和有腐蚀性气体影响的舱室内敷设电缆, 也不应穿越水舱。但上述舱室本身所必不可少的照明电缆, 应穿管敷设, 并保持舱壁密封性。在水舱内的电缆管应有防腐措施, 严禁电缆穿越油舱, 冷藏、锅炉舱内应明敷。
- (6) 电缆与船壳板、防火隔堵及甲板的敷设间距应不小于 20mm; 与双层底及滑油、燃油柜的敷设间距应不小于 50mm, 与电缆贯通件围壁间距应不小于 10mm。在离磁罗经安装中心 1m 范围内的直流馈电线路必须采用双芯电缆。
- (7) 下列电缆应尽量避免敷设在一起:
- 1) 具有不同允许工作温度的电缆尽可能不成束敷设在一起。如敷设在一起, 则所有电缆的允许工作温度应以该束电缆中允许工作温度最低的一种电缆为准。
- 2) 主用和应急用的干线、馈电线主用和备用馈电线、机舱以外的重要辅机的主用和备用机组的电缆, 都应尽量远离分开敷设。
- 3) 电力推进系统的主电路、电源电缆与励磁电缆和其他用途的低压电缆, 应分开敷设。
- (8) 桅杆、杆支柱上的电缆线路敷设的位置, 原则上规定在其背面, 在不妨碍人员踏梯上下的前提下应尽量靠近扶梯。
- (9) 电缆走线的布置应使之尽可能地实际防止火焰的传播。如无阻嫌电缆, 成束敷设的电缆则应采取阻止火焰传播措施。

- (10) 对重要设备的供电和控制电缆 (如消防系统等), 最好选用耐火电缆。
- (11) 电缆敷设弯曲半径应符合产品允许规定范围内。
- (12) 工作电压超过 50V 的金属护套电缆, 必须可靠安全接地。

1.2.3 电缆穿过舱壁、甲板

- 电缆穿过舱壁、甲板, 除了考虑电缆不应受到损伤以及保持船体强度外, 还应保证舱室原有的密封性及防火性。
- (1) 电缆穿过水密舱壁与甲板时, 对于单根电缆应设置填料函和水密电缆管, 对于成束电缆应设置组合填料函或填料盒, 以保证舱壁、甲板的密封性能。
- 填料函和填料盒中的填料应至少是阻燃和无腐蚀性的材料制成, 且在施工中与电缆运行过程中不产生对人体有害的气体或释放物, 填料在压紧填塞或灌注过程中应不致损伤电缆。
- 填料函和填料盒的水密性能, 应能承受不小于 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的水压历时 1h 的型式试验, 而无漏水现象。
- (2) 电缆穿过防火舱壁及甲板。
- 1) 电缆贯穿防火分隔应采用电缆耐火填料盒, 其基本技术要求为:
- a. 材料和耐火性能有关的结构形式和主要尺寸均应试验合格, 并经船舶检验局或相应船级社认可。填料盒中电缆占据率 (电缆截面积和与框盒内截面积之比) 不宜大于 35%, 电缆管或填料函的穿管系数不宜大于 40%。
- b. A 级耐火工艺结构应符合下列规定:
- 分隔底板材料以钢或其他等效材料制成。其构造应保证在 1h 标准耐火试验至结束时能防止火及烟通过。
- 绝缘材料层的隔热能力, 在下列规定时间的标准耐火试验中, 背火一面的平均温度较原温度升高不超过 121°C (250°F), 且在任一点的最高温度较原温度增高不超过 163°C (325°F)。
- A-60 级为 60min; A-30 级为 30min。
A-15 级为 15min; A-0 级为 0min。
- c. B 级耐火工艺结构应符合下列规定:
- 分隔底板由认可的不燃材料制成。其构造应保证在半小时的标准耐火试验至结束时能防止火焰通过。
- 绝缘材料层的隔热能力, 在下列规定时间标准耐火试验

中,其背火面的平均温度较原温度增高不超过 121℃ (250F),而任何一点的最高温度较原温度增高不超过 207℃ (405F)。

B-15 级为 15min; B-0 级为 0min。

d. 水密式的工艺结构又在耐火试验结束后,应按下列要求进行水密性试验,试件一侧承受 $5.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的水压时间为 1min 测量漏水量, 1m^2 的试件泄漏面积上的漏水量不得超过 40L/min。

为确保试件原来的水密性,试件在耐火试验前,应先按下列规定进行密性预检,试件一侧承受 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 的水压时间为 1h,而无漏水现象。

1.2.4 电缆金属护套的接地

电缆接地按其作用通常分为:安全接地、防干扰接地、工作接地。

电缆金属护套的接地是以安全接地和防干扰接地为目的。

电缆为了防止其金属护套偶然带电,或绝缘击穿使电缆护套电位升高而危害人体及导致火灾,我国船级社和国外船级社的规范均规定:超过安全电压 50V 的电缆金属护套应进行安全接地。

报房内的电缆,以及天线附近的露天甲板和木质上层建筑的电缆还需要进行防止干扰接地以防止对通信设备工作产生干扰。

防干扰接地和安全接地经常合在一起进行。

(1) 电缆接地位置。除工作电压不超过 50V 以及要求单点接地的电缆外(如控制和仪表设备用电缆),其他电缆的金属护套均应于两端进行有效接地,但最后分路电缆的金属护套允许只在电源一端接地。

(2) 电缆金属护套接地基本要求。

1) 电缆的金属护套,在其全长上(特别是在电缆经过电缆分配或连接设备时)应在电气上保持连续性。

2) 电缆的金属护套接地应接到船体永久结构或与船体相焊接的基座、支架上,亦可接至已可靠接地的设备的金属填料函或外壳上。

3) 电缆的金属护套通过专用接地导线接地时,接地线必须尽量短。

4) 金属护套与接地导体的接触面应保证有良好的接触,其接触电阻不超过 0.02Ω 。接地导体的截面应符合表 2.5-4 规定。成束电缆如采用公共接地导体接地,则接地导体截面积应按该束电缆中最大载流导体的截面选择。

表 2.5-4 接地导体截面积规定 mm²	
电缆导体截面积 S	专用铜导体截面积 Q
≤ 25	≥ 1.5
> 25	≥ 4

(3) 电缆金属护套接地形式。接地应考虑接地牢靠,操作简便。以下介绍六种接地形式。

1) 用电缆接地夹箍进行接地。对单根电缆进行接地,用电缆接地夹箍的线沟处嵌入接地线。并将接地线紧缚在电缆金属护套上,接地线的另一端接上端子以便与船体部分可靠连接,如图 2.5-2 所示。

对于成束电缆,可以用电缆接地夹箍分别将接地线紧缚在电缆金属护套上,数根接地线可合编成一根辫子线,接入端子,并与船体部分可靠连接。

电缆接地夹箍是由不经退火的纯铜 T2:(纯度为

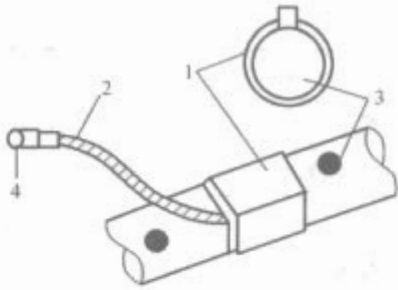


图 2.5-2 接地夹箍接地
1—接地夹箍; 2—接地线; 3—电缆; 4—端子

9.9%)制成。

2) 用金属电缆扎带进行接地使用金属电缆扎带接地时,接地处的电缆表面用砂皮磨出明显的金属光泽,并且衬垫锡箔,对有外护层电缆应把锡箔包覆延伸到外护层表面,再用金属电缆扎带将接地线紧缚在电缆的锡箔衬垫处。

3) 用金属护套编成辫子进行接地 在电缆进入设备前,利用电缆的金属编织护套重新编成辫子进行接地。

4) 用金属填料函螺母压紧金属护套进行接地 电缆进入金属填料函时,可将金属护套夹在填料函内两只锥形铜垫圈之间,再用螺母压紧达到接地的目的,如图 2.5-3 所示。

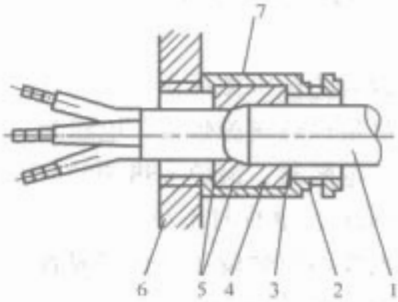


图 2.5-3 用金属填料函螺母压紧接地
1—电缆; 2—填料函螺母; 3—镀锡铜垫圈;
4—填料; 5—锥形垫圈; 6—填料函;
7—电缆金属编织护套

5) 用电缆卡子、紧钩压紧金属护套进行接地。电缆在通过电缆卡子、紧钩接地时,电缆表面以及与电缆接触的支架、紧钩表面用砂皮磨出金属光泽,并衬垫锡箔。用电缆卡子压紧金属护套进行接地,如图 2.5-4 所示。

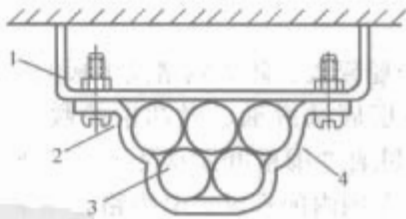


图 2.5-4 用电缆卡子、紧钩压紧接地
1—电缆支架; 2—锡箔; 3—电缆; 4—电缆卡子

6) 用高频接插件、特种插头进行接地 射频电缆金属护套采用高频接插件进行接地,因接插件有多种形式,接地方式也不同,示例如图 2.5-5 所示。

电缆金属护套也可通过特种插头(如 P、PQ、X、Q、FX、A 型等插头)进行接地。

1.2.5 电缆芯连接

电缆引入设备后按下述程序进行电缆芯连接:

- 1) 根据需要在电缆芯上套以套管或包扎绝缘带。
- 2) 切除电缆绝缘,清洁金属导体。
- 3) 配铜端子,进行冷压连接或锡焊连接。
- 4) 对电缆芯进行整理并加以捆扎。
- 5) 接入缆芯标记。

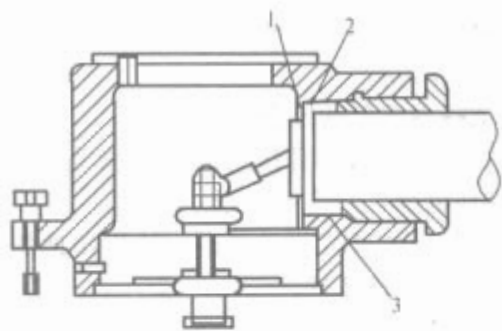


图 2.5-5 射频电缆接地方式

1—金属编织焊在垫圈处；2—垫圈；3—电缆金属编织

6) 检查接线的正确性。

电缆配用的铜端子有板型、管型、销型、针型、环型等。端子与铜线芯连接广泛使用冷压连接法，也可采用锡焊连接。

船舶上的贯通及特种设备，其连接可使用拆式插头连接，将电缆芯切割成销状，然后用电烙铁将电缆导体焊到插头或插座的焊脚上，这是一种热焊销状接头。

冷压端子的型式和尺寸分别如图 2.5-6～图 2.5-10 所示。

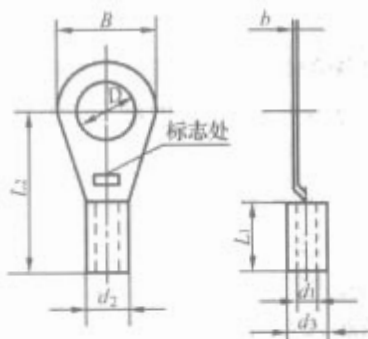


图 2.5-6 板型冷压端子图

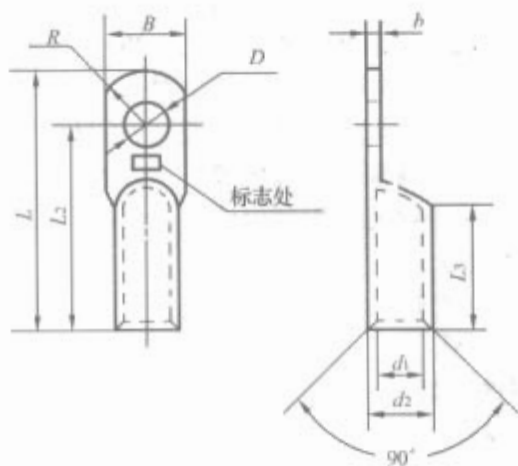


图 2.5-7 管型冷压端子图

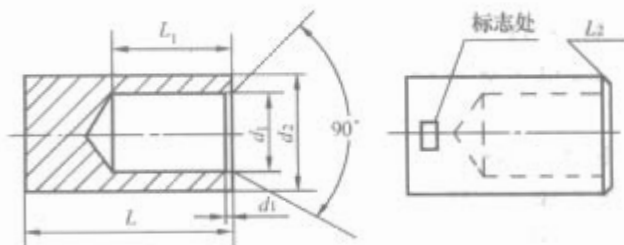


图 2.5-8 销型冷压端子图

所有冷压必须使用专用工具，压模尺寸应符合船舶专业标准《电线电缆冷压连接技术条件》中的规定，压模应与端子的选用相一致。

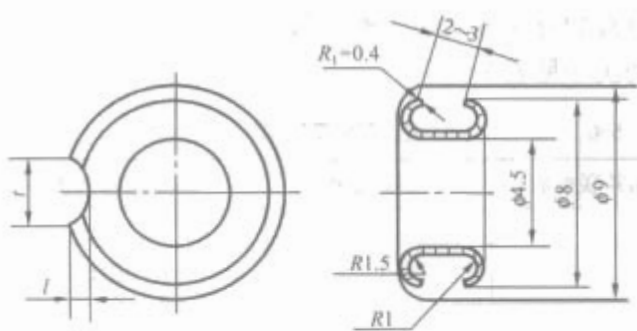


图 2.5-9 环型冷压端子图

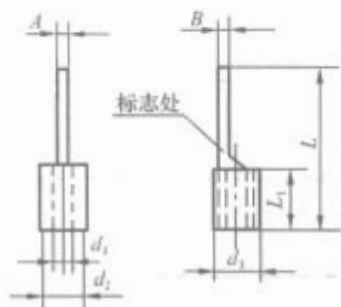


图 2.5-10 针型冷压端子图

压接后电缆接头与电缆导体间电压降不得超过 7mV，接头断裂（或拉脱）负荷不得低于表 2.5-5 规定。

表 2.5-5 接头断裂或拉脱负荷

接头规格(mm ²)	负荷值(N)	接头规格(mm ²)	负荷值(N)
0.75	74	50	1800
1	98	70	2200
1.5	150	95	2800
2.5	250	1200	3500
4	350	150	4100
6	600	185	4400
10	800	240	4600
16	980	300	5000
25	1200	400	5500
35	1500		

1.2.6 特殊场所电缆敷设要求

(1) 防干扰对电缆敷设的附加要求。为抑制船上电气装置对无线电通信及无线电导航设备所引起的干扰，对电缆敷设应采取下列措施：

1) 敷设在露天甲板和非金属上层建筑内的电缆，应采用有金属护套的电缆，或敷设在两端接地金属管或金属罩壳内。

2) 所有航行设备的电缆和进入无线电室的电缆，应有二端接地的连续金属护套。

3) 与无线电室无关的电缆不应穿过无线电室敷设，如果必须穿过时，则应敷设在连续的金属管道内，金属管道在进出无线电室处均应可靠接地。

4) 在使用单芯电缆的场合，其回路应尽量相互紧靠在一起，并应避免敷设成环形或局部环形。

(2) 单芯电缆敷设要求。不论交流电路或直流电路，均应尽量不选用单芯电缆。交流电路的单芯电缆应尽量选用无金属护套的电缆或非磁性金属护套电缆。

截面等于或大于 185mm² 交流单芯电缆而敷设长度又超过 30m 时，为使三相电路的线路阻抗达到一定程度的平衡，应每隔 15m 相线之间进行一次换位，或将三根不同的单芯电缆按品字形排列敷设。

单相并联电缆应尽量同其他相的电缆交错排列，以防止

电流负载的分配不均匀。例如每相有 2~6 根电缆时,正确的排列次序见表 2.5-6。

表 2.5-6 电缆的交错排列		
每相并联根数	一层排列次序	二层排列次序
2	ABCCBA	ABC CBA
3		ABCA BCABC
4		ABCABC CBACBA
5		ABCABCA BCABCABC
6		ABCABCABC CBACBACBA

(3) 油轮电缆敷设的附加要求。有可能暴露在货油、油蒸气或气体中的所有电缆,至少应具有下列中一种护套:铜护套(仅用于矿物绝缘电缆);铝合金护套外加机械性防护(例如铠装或非金属不透性护套);非金属不透性护套加铠装(用作机械防护和接地检测)油轮电缆敷设应符合以下附加要求。

1) 在危险区域或处所,不应敷设电缆,如要敷设船检部门许可的电缆时,则应采用本质安全电路的电缆,或电缆应敷设在接头为气密的厚钢质管子或管道内。

2) 电缆敷设时应与甲板、舱壁、油舱以及各种管子离开足够的距离(一般应为 50mm)。电缆穿过舱壁与蒸汽管道法兰的距离,当蒸汽管直径大于 75mm 时,不应小于 450mm;当蒸汽管直径等于或小于 75mm 时,不应小于 300mm。

3) 每个本质安全电路应具有各自的专用电缆,并与非本质安全电路的电缆分开敷设(例如:不应束聚在一起,不应放在同一罩壳或管道内,也不应用同一夹线板来固定)。

4) 连接可移动式电气器具的移动式软电缆或电线,不应通过危险区域或场所,但本质安全电路的软电缆或电线可以除外。

1.3 船用电缆的维护

1.3.1 电缆的外观检查

1) 检查电缆的护套、金属编织及绝缘,不允许有所损坏。

2) 检查电缆的护套及金属编织引进设备处,特别是引进甲板安装的电气设备填料函处,不允许有断裂及脱落现象。

3) 检查电缆引进白炽灯具、电阻箱、电加热器等发热电气设备的线芯绝缘,不能有烤焦剥落现象。

1.3.2 电缆贯穿及固定装置的外观检查

1) 检查电缆的紧固装置,不能有因船舶振动等因而造成的松脱现象,绑扎电缆的尼龙扎带不能有松脱、老化或断裂现象。

2) 定期检查电缆管的放水塞及甲板电缆管道的观察窗,查看管子或管道情况,不能有积水及电缆损伤现象。

3) 检查电缆通过耐火和水密舱壁贯穿装置的完整性,特别注意耐火电缆盒的隔热包覆材料及耐火填料,水密电缆盒的水密填料,不能有松脱及剥落现象。

4) 检查甲板电缆的防护装置,不允许有敲坏,锈蚀及螺丝松动等现象。

1.3.3 电缆接地装置的检查

1) 检查电缆金属护套接地的完好性及可靠性,必要时可测量其接地电阻,它应不大于 0.02Ω。

2) 检查电缆金属管子及管道、槽板接地的完整性及可靠性、电气连接的连续性。

1.3.4 电缆网络的绝缘检查

1) 通电试验后,测量电缆网络的绝缘电阻,应不低于 2000Ω/V。测量网络的绝缘电阻,包括各极(相)之间及各极(相)对地之间。测量照明网络的绝缘电阻,应在其最后分支线路上测量,包括照明器具及其附件在内。

2) 推进装置的电缆,可分别测量其热态绝缘电阻,其值应不小于 1MΩ。

2 船用电缆分类和命名

2.1 代号

GB 9331~GB 9334 标准对我国船用电缆的分类、命名和代号作了明确规定:

1) 系列代号:

- 乙丙橡皮绝缘船用电力电缆——CE
- 交联聚乙烯绝缘船用电力电缆——CJ
- 聚氯乙烯绝缘船用电力电缆——CV
- 硅橡皮绝缘船用电力电缆——CS
- 船用电力——CB
- 乙丙绝缘船用控制电缆——CKE
- 交联聚乙烯绝缘船用控制电缆——CKJ
- 聚氯乙烯绝缘船用控制电缆——CKV
- 硅橡皮绝缘船用控制电缆——CKS
- 乙丙橡皮绝缘船用对称式通信电缆——CHE
- 交联聚乙烯绝缘船用对称式通信电缆——CHJ
- 聚氯乙烯绝缘船用对称式通信电缆——CHV
- 硅橡皮绝缘船用对称式通信电缆——CHS
- 实心聚乙烯绝缘船用射频电缆——CSY
- 聚四氟乙烯绝缘船用射频电缆——CSF

2) 导体代号:

铜——T(省略)

3) 绝缘代号:

a. 热固性绝缘:

- 乙丙橡胶——E
- 交联聚乙烯——J
- 硅橡胶——S
- 无卤乙丙橡胶——E
- 无卤交联聚乙烯——J
- 交联聚烯烃——待定
- 无卤交联聚烯烃——待定
- 无卤聚烯烃——待定

b. 热塑性绝缘:

聚氯乙烯——V

4) 护层代号:

内套、铠装和外套的代号:内套采用英文字母代号、铠装和外套采用阿拉伯数字代号。

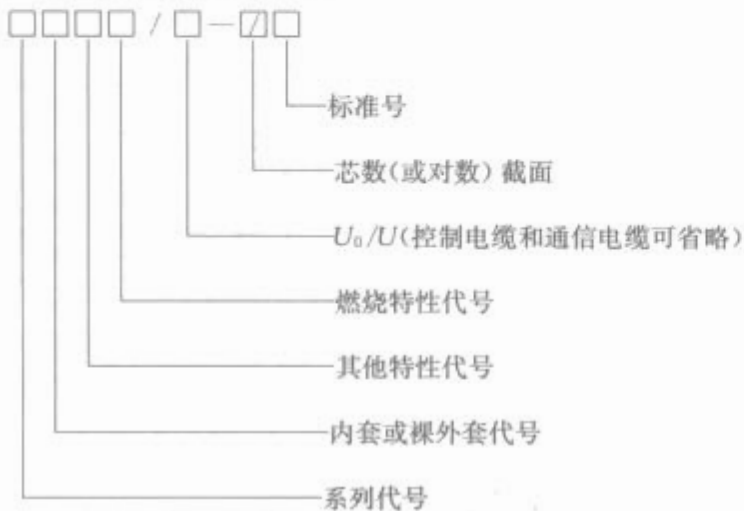
5) 特性代号:

- 软(电线或电缆)——R
- 纵向水密式(电缆)——M

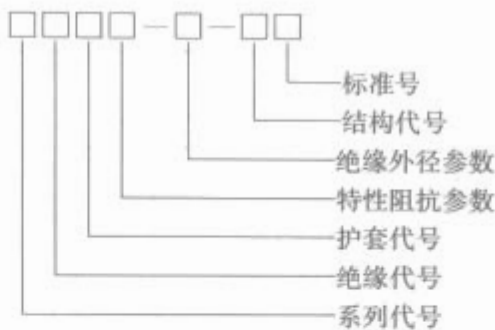
分相屏蔽——P
在火焰条件下的燃烧特性——见 (GB/T 19666—2005)

2.2 表示方法

1) 船用电力、控制和通信电缆产品用型号、规格及标准号表示, 组成如下所示。



2) 船用射频电缆产品用型号、特性阻抗、绝缘外径和标准号表示, 组成如下所示。



如为对称射频电缆, 则在结构代号之后标明芯数 (2) 和导体组成, 以区别于同轴射频电缆。

3 船用电力电缆

3.1 产品规格和结构尺寸

产品规格和结构尺寸见表 2.5-7~表 2.5-8。

3.2 计算外径和单位长度质量

规定电缆的实际外径应不超过最大值。额定电压为 1.8/3kV, 3.6/6kV, 6/10kV 和 8.7/15kV 船用电力电缆的计算外径和单位长度质量另行规定。

表 2.5-7 0.6/1kV 船用电力电缆结构尺寸的规定

导电线芯 截面积 (mm ²)	导体结构和单线直径 (根/mm)		绝缘厚度 (mm)			护套厚度 (mm)	金属丝编织层
	固定敷 设 电 缆	软 电 缆	乙丙 橡 皮	聚氯 乙 烯	交联聚 乙 烯		
1	7/0.43	32/0.20	1.0	0.8	0.7	按 GB 9331.1 标准的附录 A 计算确定	(1) 金属丝直径规定如下: 编织前电缆直 径 $d \leq 10\text{mm}$ 者, 为 0.2mm; 当 $10 < d \leq$ 30mm 时, 为 0.3mm; 当 $d > 30\text{mm}$, 则 为 0.4mm (2) 编织覆盖率应符合下列规定: 长度不 小于 250mm 成品电缆试样编织层重量应不小 于具有相同内径和厚度的同一种金属管的质 量的 90%
1.5	7/0.52	30/0.25	1.0	0.8	0.7		
2.5	7/0.68	49/0.25	1.0	1.0	0.7		
4	7/0.85	56/0.30	1.0	1.0	0.7		
6	7/1.04	84/0.30	1.0	1.0	0.7		
10	7/1.35	84/0.40	1.0	1.0	0.7		
16	7/1.70	126/0.40	1.0	1.0	0.7		
25	9/2.14	196/0.40	1.2	1.2	0.9		
35	19/1.53	276/0.40	1.2	1.2	0.9		
50	19/1.78	396/0.40	1.4	1.4	1.0		
70	19/2.14	360/0.50	1.6	1.4	1.1		
95	19/2.52	475/0.50	1.6	1.6	1.1		
120	37/2.03	608/0.50	1.6	1.6	1.2		
150	37/2.25	756/0.50	1.8	1.8	1.4		
185	37/2.52	925/0.50	2.0	2.0	1.6		
240	61/2.25	1221/0.50	2.2	2.2	1.7		
300	61/2.52	1525/0.50	2.4	2.2	1.8		

表 2.5-8 1.8/3, 3.6/6, 6/10 和 8.7/15kV 船用电力电缆结构要求

导电线芯截面积 (mm ²)	绝缘厚度 (mm)							
	乙丙橡皮				交联聚乙烯			
	1.8/3kV	3.6/6kV	6/10kV	8.7/15kV	1.8/3kV	3.6/6kV	6/10kV	8.7/15kV
10	2.2	3.0			2.0	2.5		
16	2.2	3.0	3.4		2.0	2.5	3.4	
25	2.2	3.0	3.4	4.5	2.0	2.5	3.4	4.5
35	2.2	3.0	3.4	4.5	2.0	2.5	3.4	4.5
50	2.2				2.0			
70	2.2	3.0	3.4	4.5	2.0	2.5	3.4	4.5

续表

导电线芯截面积 (mm ²)	绝缘厚度 (mm)																																															
	乙丙橡皮				交联聚乙烯																																											
	1.8/3kV	3.6/6kV	6/10kV	8.7/15kV	1.8/3kV	3.6/6kV	6/10kV	8.7/15kV																																								
95	2.4	3.0	3.4	4.5	2.0	2.5	3.4	4.5																																								
120	2.4	3.0	3.4	4.5	2.0	2.5	3.4	4.5																																								
150	2.4	3.0	3.4	4.5	2.0	2.5	3.4	4.5																																								
185	2.4	3.0	3.4	4.5	2.0	2.5	3.4	4.5																																								
240	2.4	3.0	3.4	4.5	2.0	2.5	3.4	4.5																																								
300	2.4	3.0	3.4	4.5	2.0	2.8	3.4	4.5																																								
400		3.0	3.4	4.5		3.0	3.4	4.5																																								
500		3.2	3.4	4.5		3.2	3.4	4.5																																								
630		3.2	3.4	4.5		3.2	3.4	4.5																																								
护套厚度 (mm)				金属铠装层																																												
<p>外护套及内护套 (若有的话) 之厚度 t_1 及 t_2 与未包护套的缆芯假设直径 D 有关, D 的计算方法按 IEC 92—350 中附录 A 及 B 规定, 其厚度计算公式如下</p> <p>(1) 对于铠装或无铠装层的单层护套电缆 $t_1 = (0.04D + 0.8) \text{ mm}$ (但最小厚度为 1.0mm)</p> <p>(2) 对于无铠装层的双层护套电缆 内护套 $t_1 = (0.025D + 0.6) \text{ mm}$ (但最小厚度为 0.8mm) 外护套 $t_2 = (0.025D + 0.9) \text{ mm}$ (但最小厚度为 1.0mm)</p> <p>(3) 对于有铠装层的双层护套电缆 内护套 $t_1 = (0.04D + 0.8) \text{ mm}$ (但最小厚度为 1.0mm) 外护套 $t_2 = (0.025D + 0.6) \text{ mm}$ (但最小厚度为 0.8mm)</p>				<p>(1) 编织用金属丝的直径</p> <p>1) 电缆假设外径为 30mm 及以下者, 金属丝的直径为 0.3mm</p> <p>2) 电缆假设外径大于 30mm 者, 金属丝的直径为大于或等于 0.4mm</p> <p>(2) 铠装用圆金属线的直径规定于下表</p> <table><tr><th colspan="2">铠装前外径假设值 (mm)</th><th rowspan="2">铠装金属单线直径 (mm)</th></tr><tr><th>></th><th>≤</th></tr><tr><td>—</td><td>15</td><td>0.8</td></tr><tr><td>15</td><td>25</td><td>1.6</td></tr><tr><td>25</td><td>35</td><td>2.0</td></tr><tr><td>35</td><td>60</td><td>2.5</td></tr><tr><td>60</td><td>—</td><td>3.15</td></tr></table> <p>(3) 铠装用金属带的厚度规定于下表</p> <table><tr><th colspan="2">铠装前外径假设值 (mm)</th><th colspan="2">带子厚度 (mm)</th></tr><tr><th>></th><th>≤</th><th>镀锌钢带</th><th>铝合金带</th></tr><tr><td>—</td><td>30</td><td>0.2</td><td>0.5</td></tr><tr><td>30</td><td>70</td><td>0.5</td><td>0.5</td></tr><tr><td>70</td><td>—</td><td>0.8</td><td>0.8</td></tr></table>					铠装前外径假设值 (mm)		铠装金属单线直径 (mm)	>	≤	—	15	0.8	15	25	1.6	25	35	2.0	35	60	2.5	60	—	3.15	铠装前外径假设值 (mm)		带子厚度 (mm)		>	≤	镀锌钢带	铝合金带	—	30	0.2	0.5	30	70	0.5	0.5	70	—	0.8	0.8
				铠装前外径假设值 (mm)		铠装金属单线直径 (mm)																																										
				>	≤																																											
				—	15	0.8																																										
				15	25	1.6																																										
				25	35	2.0																																										
				35	60	2.5																																										
				60	—	3.15																																										
				铠装前外径假设值 (mm)		带子厚度 (mm)																																										
				>	≤	镀锌钢带	铝合金带																																									
—	30	0.2	0.5																																													
30	70	0.5	0.5																																													
70	—	0.8	0.8																																													

3.3 性能指标

- (2) 绝缘电阻船用电缆的绝缘电阻是按产品的绝缘材料分别加以规定, 与芯数及护层结构无关 (见表 2.5-9)。
- (3) 耐电压性能 (见表 2.5-10)。

表 2.5-9 按绝缘材料而规定的船用电缆线芯绝缘电阻指标

导体截面积 (mm ²)	绝缘电阻 (MΩ · km) ≥							
	乙丙橡皮		聚氯乙烯		交联聚乙烯		天然丁苯橡皮	
	20℃	85℃	20℃	60℃	20℃	85℃	20℃	70℃
1	1382	1.382	13	0.013	1077	1.077	138	0.138
1.5	1230	1.230	11	0.011	949	0.949	123	0.123
2.5	1031	1.031	9	0.009	785	0.785	103	0.103
4	881	0.881	9	0.009	664	0.664	88	0.088
6	759	0.759	8	0.008	567	0.567	76	0.076
10	620	0.620	6	0.006	458	0.458	72	0.072
16	514	0.514	5	0.005	376	0.376	60	0.060
25	496	0.496	5	0.005	385	0.385	57	0.057
35	427	0.427	4	0.004	331	0.331	49	0.049
50	429	0.429	4	0.004	318	0.318	48	0.048

续表

导体截面积 (mm ²)	绝缘电阻 (MΩ·km) ≥							
	乙丙橡皮		聚氯乙烯		交联聚乙烯		天然丁苯橡皮	
	20℃	85℃	20℃	60℃	20℃	85℃	20℃	70℃
70	412	0.412	4	0.004	294	0.294	41	0.041
95	357	0.357	4	0.004	254	0.254	40	0.040
120	320	0.320	3	0.003	246	0.246	36	0.036
150	325	0.325	3	0.003	258	0.258	36	0.036
185	323	0.323	3	0.003	264	0.264	35	0.035
240	311	0.311	3	0.003	246	0.246	34	0.034
300	304	0.304	3	0.003	233	0.233	33	0.033

表 2.5-10 船用电力电缆耐电压试验指标

电缆额定 电压 U ₀ (kV)	试验电压值 (kV) (工频, 有效值) 5min	试验电压值 (kV) (工频, 有效值) 4h
0.6	3.5	1.8 ^①
1.8	6.5	5.4 ^①
3.6	11.0	10.8 ^①
6.0	15.0	18.0 ^①
8.7	22.0	26.1 ^①

① 试验电压值为电缆额定电压 U₀ 的 3 倍 (3U₀)。

(4) 浸水电容增率额定电压 0.6/1kV 和 1.8/3kV 电缆的绝缘线芯按标准规定方法浸水试验后的电容增加率应符合表 2.5-11 中所列计算公式和指标要求。

表 2.5-11 浸水后电容增加率计算公式和要求

电容增加率	计算公式	要求值 ^① (%)
ΔC ₁	$\Delta C_1 = \frac{C_{14} - C_1}{C_1} \times 100\%$	≤ 15
ΔC ₂	$\Delta C_2 = \frac{C_{14} - C_7}{C_7} \times 100\%$	≤ 5

注 表中的 ΔC₁ 和 ΔC₂ 为电容增加率, C₁、C₇ 和 C₁₄ 为在第 1、7 和 14 天末测量绝缘线芯导体与水之间的电容值。

① 指各种绝缘材料要求值。

表 2.5-12 成品电缆绝缘材料力学物理性能

绝缘混合物名称		普通聚 氯乙烯	乙丙 橡皮	无卤乙 丙橡皮	交联 聚乙烯	无卤 交联聚 乙烯	硅橡皮	无卤硅 橡皮	无卤聚 烯烃
1	未老化的力学性能								
1.1	抗张强度 (MPa) ≥	2.5	4.2	4.2	2.5	2.5	5.0	5.0	9.0
1.2	断裂伸长率 (%) ≥	150	200	200	200	200	150	150	120
2	在空气烘箱中老化后的力学性能								
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±2℃)	100	135	135	135	135	200	200	135
	持续时间 (h)	168	168	168	168	168	240	240	168
2.1	抗张强度 (MPa) ≥	12.5					4.0	4.0	
	抗张强度变化率 (%) ≤	±25	±30	±30	±25	±25			±30
2.2	断裂伸长率 (%) ≥	150					120	120	100
	断裂伸长率变化率 (%) ≤	±25	±30	±30	±25	±25			±30
3	在 (0.55±0.02) MPa 空气弹中老化后的力学性能								
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±1℃)		127	127					
	持续时间 (h)		40	40					

(5) 成品电缆绝缘材料力学物理性能 (表 2.5-12)。

(6) 电缆护套材料力学物理性能 (表 2.5-13)。

(7) 相容性能。电缆应能经受表 2.5-14 规定的相容性试验。相容性试验在供箱中进行老化。老化试验后的绝缘和护套的力学性能应分别满足表 2.5-12 和表 2.5-13 规定的指标。

(8) 水密性能。纵向水密电缆应能经受水密试验, 从电缆中渗出的水之体积测量值 V (cm³) 应不大于下列公式的计算值, 但其最大值应不超过 2000cm³

$$V=10N(S+2)$$

式中: N 为试样绝缘线芯数; S 为导体标称截面值, mm²。

(9) 耐燃烧性能:

1) D 型船用电缆应能满足按 IEC 332-1 规定方法进行的单根电缆垂直燃烧试验要求。

2) S 型船用电缆应能满足按 IEC 332-3 规定方法进行的成束电缆垂直燃烧试验要求。

3) 无卤船用电缆的绝缘和护套应能满足按 IEC 754-1 和 IEC 754-2 规定的卤酸气体含量、电导率和 pH 值之测量和指标要求。

4) 无卤低烟船用电缆应能满足按 IEC 1034 规定的烟密度测量方法和指标要求。

5) N 型船用电缆应能满足按 IEC 331 规定的耐火试验方法和指标要求。

续表

绝 缘 混 合 物 名 称		普通聚 氯乙烯	乙丙 橡皮	无卤乙 丙橡皮	交联 聚乙烯	无卤 交联聚 乙烯	硅橡皮	无卤硅 橡皮	无卤聚 烯烃
3.1	抗张强度变化率 (%)		±30	±30					
3.2	断裂伸长率变化率 (%)		±30	±30					
4	高温压力试验								
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差±2℃)	80							
	加负荷时间 (h): 第一种情况	4							
	第二种情况	6							
4.1	最大允许凹入深度 (%)	50							
5	热延伸试验								
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差±3℃)		250	250	200	200			200
	加负荷时间 (min)		15	15	15	15			15
	机械应力 (MPa)		20	20	20	20			20
5.1	负荷时的伸长率 (%) ≤		175	175	175	175			175
5.2	永久伸长率 (%) ≤		15	15	15	15			15
6	抗开裂试验								
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差±2℃)	150							
	持续时间 (h)	1							
绝 缘 混 合 物 名 称		普通 聚氯乙烯	乙丙 橡皮	无卤乙丙 橡皮	无卤交联 聚乙烯	无卤 硅橡皮	无卤 聚烯烃		
7	失重试验								
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差±2℃)	80							
	持续时间 (h)	168							
7.1	最大失重 (mg/cm ²)	2							
8	低温性能								
8.1	弯曲试验 (用于线芯直径≤12.5mm)								
	试验温度 (℃)	-15							
8.2	拉伸试验 (用于没有经受弯曲试验的线芯)								
	试验温度 (℃)	-15							
8.3	冲击试验								
	试验温度 (℃)	-15							
9	耐臭氧试验								
	臭氧浓度 (按体积计)		0.025~ 0.03	0.025~ 0.03			0.025~ 0.03		
	试验持续时间 (h)		30	30			30		
9.1	不产生龟裂								
10	燃烧时析出气体酸度试验								
	试验条件与方法按 IEC 754-2 规定								
10.1	pH 值 ≥			4.3	4.3	4.3	4.3		
10.2	电导率/ (μS/mm) ≤			10	10	10	10		

表 2.5-13 成品电缆护套材料力学物理性能

护套混合物名称		普通聚 氯乙烯	耐热聚 氯乙烯	氯丁 橡皮	氯磺化 聚乙烯	无卤非交 联聚烯烃	无卤交联 聚烯烃
1	未老化的力学性能						
1.1	抗张强度 (MPa) ≥	12.5	12.5	10.0	10.0	9.0	9.0
1.2	断裂伸长率 (%) ≥	150	150	300	250	125	125
2	在空气烘箱中老化后的力学性能						
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差±2℃)	100	100	100	100	100	120
	持续时间 (h)	168	168	168	168	168	168

续表

护套混合物名称		普通聚 氯乙烯	耐热聚 氯乙烯	氯丁 橡皮	氯磺化 聚乙烯	无卤非交 联聚烯烃	无卤交联 聚烯烃
2.1	抗张强度 (MPa) ≥	12.5	12.5			7.0	
	抗张强度变化率 (%) ≤	±25	±25	±30		±30	±30
	老化前百分比 (%) ≥				70		
2.2	断裂伸长率 (%) ≥	150	150	250		110	
	断裂伸长率变化率 (%) ≤	±25	±25	±40		±30	±30
	老化前百分比 (%) ≥				60		
3	浸油后的力学性能						
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±2℃)			100	100		100
	持续时间 (h)			24	24		24
3.1	抗张强度变化率 (%) ≤			±40	±40		±40
3.2	断裂伸长率变化率 (%) ≤			±40	±40		±40
4	热延伸试验						
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±3℃)			200			200
	加负荷时间 (min)			15			15
	机械应力 (MPa)			20			20
4.1	负荷时的伸长率 (%) ≤			175			175
4.2	永久伸长率 (%) ≤			15			15
5	高温压力试验						
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±2℃)	80	80			80	
	加负荷时间 (h)						
	电缆外径 ≤12.5mm	4	4			4	
	电缆外径 >12.5mm	6	6			6	
5.1	最大允许凹入深度 (%)	50	50			50	
6	抗开裂试验	12.5	12.5			7.0	
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±3℃)	150	150			150	
	持续时间 (h)	1	1			1	
7	失重试验						
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±2℃)		100				
	持续时间 (h)		168				
7.1	最大失重 (mg/cm ²)		1.5				
8	低温性能						
8.1	弯曲试验 (用于电缆外径 12.5mm 及以下)						
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±3℃)	-15	-15			-15	-15
	持续时间 (h)	16	16			16	16
8.2	拉伸试验 (用于没有经受弯曲试验的电缆)						
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±3℃)	-15	-15			-15	-15
	持续时间 (h)	4	4			4	4
8.3	冷冲击试验						
	试验条件: 温度 (℃) (允许偏差 ±3℃)	-15	-15			-15	-15
	持续时间 (h)	16	16			16	16
9	卤酸气体含量测定 (IEC 754-1)						
	卤酸气体含量 (mg/g) ≤					5	5
10	烟中透光率 (IEC 1034-1 和 IEC 1034-2)					应与电缆试验得出的最大烟密度相一致	

表 2.5-14 船用电缆相容性试验条件

老化条件	
温度 (℃)	电缆导电线芯长期允许工作温度加 10±2
持续时间 (h)	7×24

(10) 局部放电性能。额定电压 3.6/6kV, 6/10kV 和 8.7/15kV 的船用电力电缆应能满足按 IEC 885-2 规定的局部放电试验, 施加电压值为 1.5U, 其放电值应不大于 20pC。

(11) 弯曲性能。额定电压 3.6/6kV, 6/10kV 和 8.7/15kV 的船用电力电缆样品放在室温下的圆柱体上至少绕一

个全圈，然后解绕，将其反转并反向弯曲，照此反复三次。圆柱体的直径为：对于单芯电缆是 $20(d+D)(1\pm 5\%)$ mm；对于多芯电缆是 $15(d+D)(1\pm 5\%)$ mm，其中 D 为电缆试样实测外径(mm)， d 为导体实测外径(mm)。

完成上述试验后，对试样再进行局部放电试验，其放电值应不大于 20pC，

(12) 测量 $\tan\delta$ 与电压值的关系。将经受弯曲试验后的额定电压 3.6/6kV、6/10kV 和 8.7/15kV 船用电力电缆试样，在环境温度下，施加 $0.5U_0$ 、 U_0 和 $2U_0$ 。电压值测量 $\tan\delta$ ，其结果应不超过表 2.5-15 的规定。

表 2.5-15 $\tan\delta$ 与测试电压之关系

试验项目	乙丙橡皮	交联聚乙烯
U_0 时, $\tan\delta \times 10^{-4} \leq$	200	40
$0.5U_0$ 与 $2U_0$ 之间, $\Delta\tan\delta \times 10^{-4} \leq$	25	20

(13) 测量 $\tan\delta$ 与温度的关系。对额定电压 3.6/6、6/10 和 8.7/15kV 船用电力电缆试样，在规定的温度和施加 2kV 工频电压下测量 $\tan\delta$ ，其结果应不超过表 2.5-16 所规定之值。

表 2.5-16 $\tan\delta$ 与温度之关系

试验项目	乙丙橡皮	交联聚乙烯
室温时, $\tan\delta \times 10^{-4} \leq$	200	40
电缆最高额定温度 (+85℃) 时, $\tan\delta \times 10^{-4} \leq$	400	80

(14) 加热循环和局部放电性能。将经受测量 $\tan\delta$ 与温度关系试验后的样品，用交流电加热导体，使导体温度到达并稳定在 +85℃。对于多芯电缆，每一导体均应加热。加热用电流至少通 2h，继而在空气中自然冷却至少 4h，如此循环 3 次。在第三次循环后，将试样按局部放电的规定进行试验，并符合要求。

(15) 耐冲击电压性能将额定电压 3.6/6、6/10 和 8.7/15kV 船用电力电缆样品所有导体保持在 +90℃ 下，经受正与负极性的冲击电压各 10 次试验而不击穿，其冲击电压值见表 2.5-17。

表 2.5-17 耐冲击电压值

电缆额定电压 U_0 (kV)	3.6	6	8.7
试验电压 U_p (kV)	60	75	95

在经受上述试验，将试样冷却至室温，然后进行工频电压试验 15min，其试验电压值按表 2.5-17 规定。绝缘不允许击穿。

(16) 结构性能要求。

1) 铜导体应符合 GB 3956 规定。导体可以是非紧压型的，也可以是紧压型的，紧压型导体的最小标称截面为 10mm²。

挤包热固性绝缘的导体，其单线应为镀锡铜线。允许采用不镀锡的铜线，但导体与绝缘之间应有隔离层，并应对电缆进行适当的型式试验，证明不产生有害影响。

挤包热塑性绝缘的导体单线允许不镀锡。

表 2.5-19 船用控制电缆结构尺寸的规定

导电线芯截面积 (mm ²)	导体结构单线直径 (根/mm)	绝缘厚度① (mm)	护套厚度 (mm)	金属丝编织铠装
0.75	7/0.37	0.7	应符合表 2.5-20 规定	(1) 金属丝直径规定如下：编织前电缆直径 $d \leq 10$ mm 者，为 0.2mm； $d > 10$ mm 者，为 0.3mm (2) 编织覆盖率同船用电力电缆
1	7/0.43	0.7		
1.5	7/0.52	0.7		
2.5	7/0.68	0.8		

① 硅橡胶绝缘仅有 1mm² 规格，其绝缘厚度为 0.8mm。

2) 绝缘和护套材料应符合 GB 7594 或 GB 9331.1 的附录 C~F 等有关标准的要求。绝缘厚度的平均值应不小于标称值，最薄处厚度应不小于标称值的 90% - 0.1mm。光滑圆柱体表面上的护套厚度平均值应不小于标称值，其最薄处厚度应不小于标称值的 85% - 0.1mm；不规则圆柱体表面上的护套（如：内壁渗入缆芯间隙的护套或铠装层上的护套），其最薄处的厚度应不小于标称值的 85% - 0.2mm。

3) 两芯及以上电缆的绝缘线芯识别标志方式可以为绝缘着色或打印数字，允许绕包色带。用数字标志时应符合 GB 6995.4 的规定。

4) 多芯电缆缆芯的间隙应用非吸湿性材料填充。填充可以是与护套分离的，也可以是与内护套或外护套挤成一体的。导体标称截面不大于 4mm² 者可以不填充。

5) 水密电缆的导体各单线之间，导体与绝缘之间，绝缘线芯之间，绝缘与护套之间，护套与铠装之间，均应用特殊材料填充，在整个电缆制造长度上连续密封。

6) 编织铠装的金属丝应符合表 2.5-18 的规定。

表 2.5-18 船用电缆编织铠装金属丝的要求

铠装前缆芯计算直径 d (mm)	镀锌钢丝		镀锡铜丝	
	标称直径 (mm)	镀层要求	标称直径 (mm)	镀层要求
$d \leq 10$	0.2	按 GB 9331.1 标准的附录 G 试验合格	0.2	铠装前试样，按 GB 4909.9 试验合格
$10 < d \leq 30$	0.3		0.3	
$d > 30$	0.4		0.4	

编织覆盖率 F 应符合下列规定：长度不小于 250mm 成品电缆试样编织层的质量，应不小于具有相同内径和厚度的同一种金属管质量的 90%

$$F = \pi / 2K \times 100\%$$

式中： K 为填充系数。当 F 的最小值为同种金属管体质量的 90% 时， K 的最小值为 0.573。

编织层应均匀，表面应平整。编织层不许整体接续，股线可焊接或插接，插接时金属丝端头应不外露。裸镀锌钢丝编织铠装层应均匀涂覆防锈漆。

7) 金属丝铠装的金属丝应均匀地基本无空隙地绕包在内衬层上。铠装前外径小于 15mm 者，可采用扁金属丝代替圆丝。镀锌钢丝的断裂伸长率应不小于 12%。

8) 金属带铠装的两层金属带以同一方向间隙绕包在内衬层上，内层的绕包间隙应不大于带宽的 0.5 倍，且应被外层金属带遮盖。铠装前外径小于 10mm 者，不宜采用金属带铠装。钢带可以镀锌或涂漆。

4 船用控制电缆

4.1 产品规格和结构尺寸

产品规格和结构尺寸见表 2.5-19~表 2.5-20。

表 2.5-20 船用控制电缆护套厚度的规定 mm

电缆类型	绝缘类型	护 套	绝缘线芯数目													
			2		4		7		10, 14		19		24		30, 37	
			导体标称截面 (mm ²)													
			0.75 1 1.5	2.5	0.75 1 1.5	2.5	0.75 1 1.5	2.5	0.75 1 1.5	2.5	0.75 1 1.5	2.5	0.75 1 1.5	2.5	0.75 1 1.5	2.5
单护套有 或没有外 金属编 织层	乙丙橡皮 交联聚乙 烯聚氯乙烯	单层标 称值	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1.4	1.5	1.6	1.5	1.6
	硅橡皮	同上	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7
单护套有 内金属 编织层	乙丙橡皮 交联聚乙 烯聚氯乙烯	单层标 称值	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.5	1.6	1.6	1.7
	硅橡皮	同上	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8
双护套, 没有金属 编织层	乙丙橡皮	内套 近似值	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	0.9	1.1	0.9	1.1	1.0	1.2	1.1	1.3
	交联聚乙 烯 聚氯乙烯	外套 标称值	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.4	1.5
	硅橡皮	内套 近似值	0.8		0.8		0.8		0.9		1.0		1.0		1.1	
		外套标 称值	1.1		1.1		1.2		1.3		1.3		1.4		1.5	
双护套, 没有金属 编织层	乙丙橡皮	内套 近似值	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.3	1.3	1.5	1.3	1.5	1.5	1.7	1.5	1.7
	交联聚乙 烯 聚氯乙烯	外套 标称值	0.8	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
	硅橡皮	内套 近似值	1.1		1.2		1.2		1.3		1.4		1.5		1.6	
		外套 标称值	0.9		0.9		0.9		1.0		1.1		1.2		1.2	

4.2 计算外径和计算质量

船用控制电缆规定电缆的实际外径应不超过最大值。电缆的计算质量不作考核, 供设计、使用部门参考。

4.3 性能指标

(1) 电性能 (表 2.5-21)。

表中绝缘电阻常数 K ($M\Omega \cdot km$) 的换算公式如下:

1) 已知电缆绝缘电阻时

$$K_i = R / \log_{10} D / d$$

式中: R 为测得的电缆绝缘电阻值, $M\Omega \cdot km$; D 为绝缘线芯的绝缘外径, mm; d 为绝缘线芯的绝缘内径, mm。

2) 已知绝缘混合物的体积电阻系数 ρ_v 时

$$K_i = 0.367 \times 10^{-11} \rho_v$$

(2) 绝缘和护套物理力学性能。参见船用电力电缆。

(3) 耐油、耐燃烧、低温性能等。参见船用电力电缆。

(4) 结构性能要求同船用电力电缆。

表 2.5-21 船用控制电缆电性能

20℃时导体电阻 (Ω/km) \leq			绝缘电阻		成品耐电压 (5min)	
导体截 面积 (mm ²)	不镀锡 铜丝	镀锡 铜丝	绝缘材料 类 型	20℃时绝缘 电阻常数 K_i $M\Omega \cdot km \geq$	试验电压(kV), 有效值	
					交流	直流
0.75	24.5	24.7	乙丙橡皮	3670	1.5	3.6
1	18.1	18.2	交联聚乙烯	3670		
1.5	12.1	12.2	聚氯乙烯	36.7		
2.5	7.41	7.56	硅橡皮	1500		

5 船用通信电缆

5.1 产品规格和结构尺寸

产品规格和结构尺寸见表 2.5-22。

5.2 计算外径和计算质量

船用通信电缆的实际外径应不超过最大值。电缆的计算质量不作考核, 供设计、使用部门参考。

5.3 性能指标

(1) 电性能 (表 2.5-23)。

(2) 绝缘和护套物理力学性能。参见船用电力电缆。

(3) 耐燃烧、低温性能等。参见船用电力电缆。

(4) 结构性能要求。

1) 绞合元件可由线组 (对线组、三线组和四线组) 和单位组成。绞合元件的绞合节距应不大于 120mm。

2) 线芯每层或每个单位中可加一个绝缘线芯作为计数线芯, 其导体直径与元件的导体直径相等, 绝缘的颜色应为红/白色。计数元件不作为线芯元件计数。

3) 缆芯中相邻各对应采用不同的绞合节距, 必要时采用较短节距。

4) 缆芯至少应绕包两层聚酯薄膜或其他非吸湿性薄膜, 总厚度应不小于 0.1mm。

5) 绝缘线芯和绞合元件的识别:

a. 绝缘标称厚度为 0.25mm 者应符合下列规定:

同心式电缆中或单位式电缆每一单位中的绞合元件和绝缘线芯的识别, 应以色谱为基础。

表 2.5-22 船用通信电缆结构尺寸的规定

导体 截面积 (mm ²)	导体结构 与单线 直径 (根数/mm)	绝缘厚度 (mm)		护套厚度 (mm)					铜丝编织铠装	
		标称值	最小值	护套前计 算外径 <i>d</i> (mm)	热塑体双护套		单护套标称值		铠装前计算 直径 <i>D</i> (mm)	铜丝标 称直径 (mm)
					内套近似值	外套标称值	热塑体	热固体		
0.3	7/0.25	0.25	0.20	<i>d</i> < 10	0.8	1.1	1.1	1.2	<i>D</i> < 14	0.20
				10 < <i>d</i> < 15	0.9	1.2	1.2	1.4		
0.5	7/0.30	0.50	0.35	15 < <i>d</i> < 20	1.0	1.3	1.3	1.4	14 < <i>D</i> < 20	0.25
				20 < <i>d</i> < 25	1.2	1.4	1.4	1.6		
0.75	7/0.37	0.60	0.44	25 < <i>d</i> < 30	1.3	1.5	1.6	1.8	<i>D</i> > 20	0.30
				<i>d</i> > 30	1.3	1.6	1.8	2.0		

表 2.5-23 船用通信电缆电性能

20℃时导体直流电阻 (Ω/km) ≤			绝缘电阻 (MΩ·km)		电压试验			工作电容 (任一对线芯间)			电容不平衡 (任一对线芯间)		
导体截 面积 (mm ²)	不镀锡 铜线	镀锡 铜线	绝缘材 料类型	20℃时绝缘 电阻常数 ^① K _i (MΩ·km) ≥	绝缘标 称厚度 (mm)	试验电压 有效值 (V)		持续 时间 (min)	绝缘 类型	绝缘标 称厚度 (mm)	工作电容 (nF/km) ≤	每 500m 电缆长度 应不大于 1000pF; 不足 500m 时, 长度 L 的测量除以下列修 正系数: $\frac{1}{2} \left(\frac{1}{500} + \sqrt{\frac{L}{500}} \right)$	
						交流	直流						
0.3	57.6	—	乙丙橡皮	3670	0.25	1000	1500	1	普通聚 氯乙烯	0.25	200		
			交联聚 乙烯	3670						0.50	1500		3000
0.5	36.0	36.7	普通聚 氯乙烯	36.7	0.60	1500	3000	5					
			硅橡皮	1500									

① 绝缘电阻常数 *K* 的换算公式同船用控制电缆。

所有绞合元件只能用 a 线和 b 线识别, 其标志色谱应符合 GB 9333.1—1988 附录 A 规定。单位式电缆允许只采用 1 号计数组色谱。

c 线和 d 线应各有一种明显区别于 a 线和 b 线的识别颜色, 且在所有绞合元件中都是这一种颜色。

绝缘线芯采用组合颜色标志时, 标志应为环状或单螺旋线 (参阅 GB 9333.1)。

b. 绝缘标称厚度为 0.50mm 及以上者, 可在下列规定中任选一种:

数字识别——符合 GB 6995.4 规定, 每一个对线组中应有编号 1 的绝缘线芯。

颜色识别——符合表 2.5-24 的规定。

表 2.5-24 船用通信电缆绝缘线芯颜色识别

线组类别	绝缘线芯识别				线组识别
	a	b	c	d	
对线组	黑	蓝	—	—	4 对及以上电缆用印有数字的扎带识别
三线组	黑	蓝	褐	—	—
四线组	黑	褐	蓝	灰	—

c. 单位识别: 在每个单位上螺旋疏绕着色扎带, 其色

谱应符合 GB 9333.1 附录 B 规定。也可以在扎带上印数字标志。数字的高度应不大于 3mm, 相邻数字中心间距应不大于 20mm。

d. 计数应从电缆中心层或单位的中心层开始到外层, 计数方向为顺时针方向。

6) 其余结构要求同船用电力电缆。

6 船用射频电缆

6.1 产品规格与结构尺寸

表 2.5-25 中的外导体由金属丝编织套组成, 具体组成如表 2.5-26 中规定。

(1) 编织角按下式确定

$$\alpha = \operatorname{arccot} 2D/L$$

$$D = \text{介质直径} + 2d$$

式中: *D* 为编织层平均直径, mm; *d* 为金属丝直径, mm; *L* 为编织节距, mm。

(2) 填充系数 *K* 按下式确定

$$K = ndp/\sin\alpha$$

式中: *n* 为每锭中金属丝根数, *d* 为金属丝直径, mm; *p* 为单位长度内的交叉锭数, 锭数/mm; α 为电缆轴线与编织锭股线的倾斜角, (°)。

表 2. 5-25 船用射频电缆结构尺寸的规定

电缆型号	电缆规格代号	内导体		绝缘厚度 (mm) ≥	外导体材料		护套厚度 (mm)		镀锌钢丝编织铠装
		材料	结构		内层	外层	最小值	标称值	
CSYV CSYV90	50-7-2	铜线	7/0.75	2.0		铜线	0.85	1.05	(1) 镀锌钢丝直径为 0.3mm (2) 填充系数 K 应不小于 0.6 (计算公式见 GB 9334.1—1988)
	50-7-6	铜线	7/0.75	2.25	镀银铜线	铜线	0.9	1.1	
	50-12-1	铜线	7/1.15	3.5		铜线	1.0	1.3	
	50-12-2	铜线	1/5.0	5.5		铜线	1.5	1.8	
	50-12-3	铜线	1/5.0	5.5	铜线	铜线	1.55	1.85	
CSFF	50-7-8	镀银铜线	7/0.82	2.0	镀银铜线	镀银铜线	0.70	1.0	—
CSYV CSYV90	75-4-1	铜线	7/0.21	1.25		铜线	0.6	0.8	(1) 镀锌钢丝直径为 0.3mm (2) 填充系数 K 应不小于 0.6 (计算公式见 GB 9334.1—1988)
	75-4-2	铜线	7/0.21	1.40	铜线	铜线	0.65	0.85	
	75-7-2	铜线	7/0.40	2.40		铜线	0.85	1.05	
	75-7-3	铜线	7/0.40	2.72	铜线	铜线	0.9	1.1	
	75-17-2	铜线	1/2.70	6.60	—	铜线	1.5	1.8	
CSFF	75-7-11	镀银铜包钢线 1 级	7/0.45	1.96	—	镀银铜线	待定	待定	—

表 2. 5-26 船用射频电缆外导体组成的规定

结构类型	材 料		绝缘标称外径 (mm)			结构参数	
	内 层	外 层	3.7~4.8	7.25~11.5	17.3	编织角≤	填充系数 K
			编织层金属丝直径 (mm)				
单层编织层		裸铜线	0.13~0.15	0.18~0.20	0.24~0.26	45°	0.70~0.95
		镀银铜线	0.13~0.15	0.18~0.20	0.24~0.26	45°	0.70~0.95
双层编织层	镀银铜线	裸铜线	0.13~0.15 *	0.16~0.18	0.18~0.20	45°	0.70~0.95
	镀银铜线	镀银铜线	0.13~0.15	0.16~0.18	0.18~0.20	45°	0.70~1.05

6. 2 计算外径与计算质量

船用同轴射频电缆的实际外径应不超过最大值。电缆的计算质量不作考核, 供设计、使用部门参考。

6. 3 性能指标

- (1) 电性能。
1) 导体电阻率 (表 2. 5-27)。

表 2. 5-27 船用同轴射频电缆导体电阻率的规定

铜电阻率(Ω·mm ² /m)≤		铜包钢丝电阻系数 ^①		
铜	镀银铜	级别编号	铜/钢 (%)	电阻系数
0.017 241	0.017 241	1	≈40	2.8
		2	≈30	3.5
		3	≈40	2.8

① 该系数是指铜包钢线的有效直流电阻与同直径圆铜线直流电阻之比。

- 2) 绝缘电阻。20℃时内外导体之间的绝缘电阻应不小于 5000MΩ·km。
3) 绝缘耐电压性能 (表 2. 5-28)。

表 2. 5-28 船用同轴射频电缆绝缘耐电压性能

绝缘标称外径 (mm)	特性阻抗 (Ω)		持续时间 (min)
	50	75	
	试验电压 (kV)		
3.0~4.8		4	1

续表

绝缘标称外径 (mm)	特性阻抗 (Ω)		持续时间 (min)
	50	75	
	试验电压 (kV)		
7.25~10.0	10	8	1
11.5	15		1
17.3	22	18	1

- 4) 护套耐电压性能 (表 2. 5-29)

表 2. 5-29 船用同轴射频电缆护套耐电压性能指标

护套标称厚度 <i>t_s</i> (mm)	浸水试验		火花试验	
	试验电压 (kV)	持续时间 (min)	试验电压 (kV)	每点接触时间 (s) ≥
<i>t_s</i> ≤ 0.5	不试验		不试验	
0.5 ≤ <i>t_s</i> < 0.8	2	1~2	3	0.1
0.8 ≤ <i>t_s</i> < 1.0	3	1~2	5	0.1
<i>t_s</i> > 1.0	5	1~2	8	0.1

- 5) 电晕试验 (表 2. 5-30)。

表 2. 5-30 船用同轴射频电缆电晕试验指标

电缆型号	电缆规格代号	灭晕电压 (kV) (rms) ≥
CSYV CSYV90	50-7-2	5
	50-7-6	5
	50-12-1	7.5

续表

电缆型号	电缆规格代号	灭晕电压 (kV) (rms) ≥
CSYV CSYV90	50-17-2	11
	50-17-3	11
CSFF	50-7-8	4
CSYV CSYV90	75-4-1	2
	75-4-2	2
	75-7-2	4
	75-7-3	4
	75-17-11	9
CSFF	75-17-3	3.4

6) 衰减常数 (表 2.5-31)。

表 2.5-31 船用同轴射频电缆衰减常数的规定

电缆型号	电缆规格代号	衰减常数 (dB/m) ≤	
		200MHz	3000MHz
CSYV CSYV90	50-7-2	0.11	—
	50-7-6	—	0.62
	50-12-1	0.08	—
	50-17-2	0.056	—
	50-17-3	0.06	—
CSFF	50-7-8	待定	—
CSYV CSYV90	1975-4-1	0.22	—
	1975-4-2	—	0.95
	1975-7-2	0.12	—
	1975-7-3	—	0.6
	75-17-2	0.056	—
CSFF	1975-7-11	0.105	—

7) 特性阻抗 (表 2.5-32)。

表 2.5-32 船用同轴射频电缆特性阻抗

电缆型号	电缆规格代号	特性阻抗 Z_c (Ω)	
		≥	≤
CSYV CSYV90	1950-7-2	48	52
	1950-7-6	49	51
	1950-12-1	48	52
	50-17-2	48	52
	50-17-3	48	52
CSFF	1950-7-8	48	52
CSYV CSYV90	1975-4-1	72	78
	1975-4-2	73.5	76.5
	1975-7-2	72	78
	1975-7-3	73.5	76.5
	75-17-2	72	78
CSFF	1975-7-11	72	78

(2) 机械物理性能。

1) 加热污染性能 (表 2.5-33)。

表 2.5-33 船用同轴射频电缆加热污染性能

电缆型号	电缆规格代号	试验条件		试验结果
		温度 (°C)	时间 (h)	3000Hz 时的衰减增值 (dB/m)
CSYV CSYV90	50-7-2	100±2	168	0.75
	50-7-6			0.2
	50-12-1			0.2
	50-17-2			0.4
	50-17-3			0.15
	75-4-1			—
	75-4-2			0.3
	75-7-2			0.75
	75-7-3			0.2
	75-17-2			0.4

2) 加热卷绕性能 (表 2.5-34)。

表 2.5-34 船用同轴射频电缆加热卷绕性能

电缆护套类型	试验条件				试验结果
	温度 (°C)	时间 (h)	试棒直径 (mm)	卷绕次数	
聚氯乙烯护套	100±9	168	10D	5min 内 10 次	绝缘和护套应无机械损伤
聚四氟乙烯护套	200±5	168	10D	5min 内 10 次	

注 D—试样外径, mm。

3) 高温后冷弯曲性能 (表 2.5-35)。

表 2.5-35 船用同轴射频电缆高温后冷弯曲性能

电缆护套类型	高温暴露		低温暴露		卷绕			试验结果
	温度 (°C)	时间 (h)	温度 (°C)	时间 (h)	试棒直径 (mm)	卷绕速度 (r/4s)	卷绕圈数	
聚氯乙烯护套电缆	100±2	168	-35	20	10D	1	试棒外径 $D < 12.7\text{mm}$ 者 3 圈; $D \geq 12.7\text{mm}$ 者为 1 圈	绝缘和护套应无机械损伤
聚四氟乙烯护套电缆	250±5	168	-55	20	10D	1		

注 D—试样外径, mm。

4) 低温弯曲性能 (表 2.5-36)。

表 2.5-36 船用同轴射频电缆低温弯曲性能

护套类型	试验温度 (°C)	持续时间 (h)	试棒外径 (mm)	卷绕圈数	试验结果
聚氯乙烯护套电缆	-40	20	10D	$D < 12.7\text{mm}$ 者为 3 圈; $D \geq 12.7\text{mm}$ 者为 1 圈	绝缘和护套应无机械损伤
聚四氟乙烯护套电缆	-55	20	10D		

注 D—试样外径, mm。

5) 流动性能 (表 2.5-37)。

表 2.5-37 船用同轴射频电缆热流动性能

电缆型号	电缆规格代号	试验温度 (℃)	持续时间 (h)	负荷 (N)	绝缘流动位移 (%) ≤
CSYV CSYV90	1950-7-2	100±2	7.5	100	15
	1950-7-6			100	
	1950-12-1			215	
	50-17-2				
	50-17-3				
	1975-4-1			25	
	1975-4-2			29	
	1975-7-2			80	
	1975-7-3			80	
	75-17-2				

(3) 结构性能要求。

1) 实芯内导体经最后一次拉制后不应再焊接。绞合内导体的单线可以用无酸焊剂钢焊或银焊，各焊接点间的距离应不小于 300mm。焊接处的外径不应增加，且无块状物或尖锐凸起。

2) 外导体由金属丝编织套组成。

3) 导体材料应符合下列规定：

a. 铜线应符合 GB 3953 的 TR 型。

b. 镀银铜线应符合 JB 3135 的 TRY 型。

c. 铜包钢线，铜层应均匀，其厚度在整个长度上应保持一致。

(4) 镀锌钢丝编织铠装层表面应平整，不许整体接续，股线可焊接或搭接，搭接时金属丝端头应不外露。

铠装层上应涂覆防锈漆。

7 船用耐火电缆

船用耐火电缆是船用电缆中的一个重要品种，从电力、照明到控制、仪表、通信及广播等均有它的产品。鉴于近年来对船舶的安全及防火等要求日益得到重视，对船用耐火电缆的使用更为广泛对其要求也更为提高。

全世界各大船级社如中国(CCS)、英国(LR)、德国(GL)、美国(ABS)、法国(BV)、挪威(DNV)及日本(NK)等船级社的海建造规范中及国际海上人命公约(SOLAS)对在船舶(主要指海轮)中的下述设备及系统中必须使用船用耐火电缆都有明确的规定(略有不同)。这些设备及系统综述如下：

轮机的供电及控制系统

应急照明系统

电力操作的水密门的供电、控制及显示系统

电力操作的防火门的供电、控制及显示系统

火警探测及报警系统

消防系统(消防泵供电、控制)

通风系统(防火风闸)

有线广播系统

低位照明系统

近年来中国电工学会曾对我国各大造船厂进行了调查，全船使用耐火电缆的比率如下：

散装货轮 2%~8%

集装箱货轮 8%~11%

多用途轮 15%~22%

大型油轮 14%~25%

火车渡轮 14.5%

目前国内外使用的耐火船用电缆共分为三种类型：

(1) 传统的结构，即在较好的导体上绕包云母带再挤包绝缘层。

(2) 是在导体上挤包特殊的耐火无卤复合层 (Special Fire Resistant Halogen Free Compound)。

(3) 氧化镁绝缘，铜管护套电缆。

以上三种类型的船用耐火电缆都还要求通过 IECGO332-3 中 A 类或未阻燃试验。三种类型电缆比较而言，可靠性优选矿物绝缘电缆

8 船用电缆特殊试验方法

8.1 浸水电容试验

(1) 试验设备。

1) 水槽：保持水面不变，水温保持 50℃±2℃恒温。

2) 空气烘箱。

(2) 试样制备。

1) 试样为电缆的任一根绝缘线芯长 4.5m。按 GB 2951.1 的第 2.4 条规定取样。绝缘径向厚度应大于或等于 0.8mm。

2) 除去绝缘层外的任何覆盖层，包括橡皮布带，如为两层绝缘时则应保持两层绝缘状态。

3) 将按第 2) 条处理的绝缘线按下列规定经受电压试验：

a. 浸入室温水中，两端露出水面。

b. 按下表进行交流或直流电压试验，击穿试样不能用于此项试验。

额定电压 (U_0/U)/(kV)	试验电压(kV)		持续时间 (min)
	交流	直流	
0.6/1	3.5	8.4	5

(3) 试验步骤。

1) 试样在 70~75℃ 的空气烘箱中干燥 24h。

2) 取出试样后，立即放入水槽中浸泡在预先加热到 (50±2)℃ 的水中。中间浸水部分为 3m，两端各露出 0.75m，在该温度的水中保持 14 天。

3) 在频率为 800~1000Hz 的低压交流电压下，在导体和水之间测量第 1 天，第 7 天和第 14 天的电容。

(4) 试验结果应符合有关标准的规定。

8.2 水密性试验

(1) 试验设备。

1) 水槽：水槽上有水压控制装置和密封填料函。填料函用以将试样扣紧在水槽上，它能既不使试样被压缩，又不被扩张，且能防止漏水。

2) 水压压力表。

3) 漏水检测装置。

(2) 试样制备。从成品电缆上截取长 1.5m 试样 2 个。试样应未经过受曲绕、加热或其他任何试验，试样上的裸铠装可以剥除。

(3) 试验步骤：

1) 将试样一端装入水槽。

2) 在 1min 内将水压升到 0.1MPa，并保持 3h。

- 3) 收集从试样另一端或试样表面渗出的水,并测量其体积。
- (4) 试验结果。渗水的体积应符合有关电缆标准的规定。

8.3 镀锌钢丝镀层附着性试验

- (1) 试验设备:
- 1) 玻璃容器: $\phi 35 \times 160\text{mm}$ 。
- 2) 试验溶液: 187g/L 硫酸铜液 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 温度保持 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。完全溶解后, 每升溶液中可加入 1~2g 的氢氧化铜 (或粉状碳酸铜, 或氧化铜) 以中和游离硫。
- (2) 试样准备。从成品电缆上截取长约 200mm 的试样 5 个。用蘸汽油的脱脂棉或棉纱、棉布擦干净试样, 并使之干燥。
- (3) 试验步骤:
- 1) 在容器中倒入 4/5 容器容积的试验溶液。
- 2) 将一个试样浸泡在试验溶液中 1min。静置不搅拌。1min 后取出, 立即在自来水中用棉纱清洗, 除去试样表面海绵状沉积铜。
- 同一试样如此反复浸泡, 直至用棉纱不能除去试样表面的析出铜为止。试样浸泡端 30mm 以内那部分表面上的析出铜不考核。
- 注意: 直径小于 0.8mm 的试样浸泡时间为 0.5min。
- 3) 记录该试样的浸泡次数。
- 4) 更换试样溶液, 试验第 2 个试样。
- 5) 按上述 1)~4) 的规定试验全部试样完毕后, 计算出五个试样的平均浸泡次数。
- (4) 试验结果判断。
- 1) 五个试样的平均浸泡次数应符合下表的规定:

试样外径 (或厚度) 标称值 (mm)	浸泡次数 \geq
$d \leq 1.3$	1
$1.3 < d \leq 2.0$	2
$2.0 < d \leq 2.5$	3
$2.5 < d \leq 5.1$	4

- 2) 当锌层本体上附有铜时, 将造成不合格的错觉, 此

表 2.5-38 单根船用电缆载流量^①

绝缘材料和工作温度	普通聚氯乙烯 60℃			耐热聚氯乙烯 75℃			乙丙橡皮或交联聚乙烯 85℃			硅橡皮或矿物绝缘 95℃		
	1	2	3 或 4	1	2	3 或 4	1	2	3 或 4	1	2	3 或 4
导体截面积 (mm ²)												
1	8	7	6	13	11	9	16	14	11	20	17	14
1.5	12	10	8	17	14	13	20	17	14	24	20	17
2.5	17	14	12	24	20	17	28	24	20	32	27	29
4	22	19	15	32	27	22	38	32	27	42	36	39
6	29	25	20	41	35	28	48	41	34	55	47	53
10	40	34	28	57	48	40	67	57	47	75	64	70
16	54	46	38	76	65	53	90	77	63	100	85	95
25	71	60	50	100	85	70	120	102	84	135	115	116
35	87	74	61	125	106	88	145	123	102	165	140	140
50	105	89	74	150	128	105	180	153	126	200	170	179
70	135	115	95	190	162	133	225	191	158	255	217	217
95	165	140	116	230	196	161	275	234	193	310	264	252
120	190	162	133	270	230	189	320	272	224	360	306	287
150	220	187	154	310	264	217	365	310	256	410	349	329

- 时应作如下处理:
- a. 浸泡次数完成后, 再进行其他合宜方法的附着性试验。
- b. 用棉纱轻轻擦去附着在浸泡过的试样上的铜, 或者浸入抓化氢溶液 (1/10) 中 15s 后, 立即用自来水清洗并用力擦去铜。若铜除去后试样表面露出锌层, 则判为试样合格。

9 船用电缆载流量

9.1 单根电缆连续工作制的载流量

- (1) 电缆的连续工作制系指载流 (恒定负载) 的时间大于电缆的发热时间常数的 3 倍, 即大于临界持续时间 (见图 2.5-11)。
- (2) 各种绝缘材料的单根电缆连续工作制载流量见表 2.5-38。在选择这些载流量时可不考虑电缆保护层的类型 (如有无铠装等)。

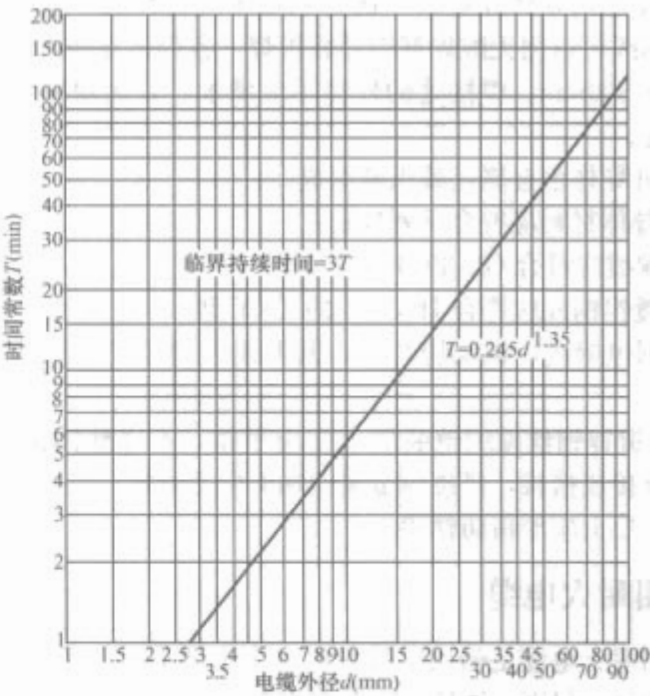


图 2.5-11 电缆的时间常数

续表

绝缘材料和工作温度	普通聚氯乙烯 60℃			耐热聚氯乙烯 75℃			乙丙橡皮或交联聚乙烯 85℃			硅橡皮或矿物绝缘 95℃		
导体截面 (mm ²)	1	2	3 或 4	1	2	3 或 4	1	2	3 或 4	1	2	3 或 4
185	250	213	175	350	298	245	415	353	291	470	400	
240	290	247	203	415	353	291	490	417	343			
300	335	285	234	475	404	332	560	476	392			

① 环境温度为 45℃。

(3) 当电缆芯数超过四芯时，一般应将表 2.5-37 中单芯电缆载流量乘以下列系数：

芯数	系数	芯数	系数
5~6	0.56	25~42	0.42
7~24	0.49	43 及以上	0.35

注 考虑到同时工作系数，上述系数可以适当放宽。

9.2 不同环境温度的修正系数

表 2.5-38 所列的载流量是以环境温度 45℃为基准的。这对于任何船舶在任何气候条件下航行都是适用的。但考虑到特殊用途的船舶（例如沿海船舶、渡船和港口船舶等）的环境温度经常低于 45℃，则表 2.5-38 所列的载流量可以增加。

当预计到电缆周围的空气温度高于 45℃（例如当电缆全部或局部通过高温处所或舱室）时，则表 2.5-38 所列的载流量应减少。

不同环境空气温度时的修正系数见表 2.5-39。

表 2.5-39 不同环境空气温度时的修正系数

导体长期允许 工作温度(℃)	不同环境空气温度(℃)										
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
60	1.29	1.15	1.00	0.82							
65	1.22	1.12	1.00	0.87	0.71						
70	1.18	1.10	1.00	0.89	0.77	0.63					
75	1.15	1.08	1.00	0.91	0.82	0.71	0.98				
80	1.13	1.07	1.00	0.93	0.85	0.76	0.65	0.53			
85	1.12	1.06	1.00	0.94	0.87	0.79	0.71	0.61	0.50		
90	1.10	1.05	1.00	0.94	0.88	0.82	0.74	0.67	0.58	0.47	
95	1.10	1.05	1.00	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63	0.55	0.45

9.3 成束电缆的修正系数

成束敷设在导板上、管子、管道或电缆槽内的电缆，一般不用修正系数，可直接采用表 2.5-37 所列的载流量。但是当超过 6 根的电缆以额定负载同时工作（一般属于同一电路），而且又相互紧靠在一起成束敷设使电缆周围无空气自由循环时，则应用 0.85 修正系数。

注：①在单独的管道、电缆槽或电缆通道内，或者若未被封闭但相互间不可分开的 2 根或 2 根以上的电缆，均称为电缆束；②敷设层数一般不超过二层或高度不超过 50mm。

9.4 非连续工作制的修正系数

(1) 0.5h 或 1.0h 工作制的修正系数可采用图 2.5-11 给出的相应的修正系数。但图 2.5-11 给出的修正系数仅在停止工作的时间超过图 2.5-11 中给出的临界持续时间（临界持续时间等于电缆时间常数的 3 倍）的情况下才适用。

图 2.5-12 给出的修正系数是近似值，主要取决于电缆直径。通常 0.5h 工作制适用于绞车和锚机等。

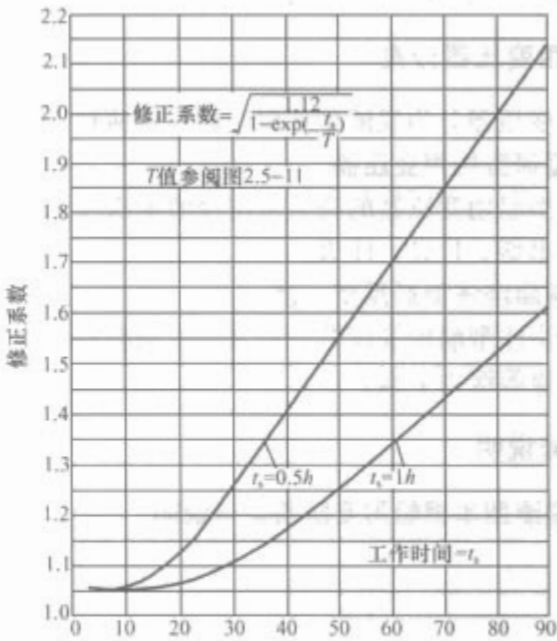


图 2.5-12 “半小时”和“1 小时”工作制的修正系数

(2) 重复短时工作制的修正系数可采用图 2.5-13 所给出的相应的修正系数。

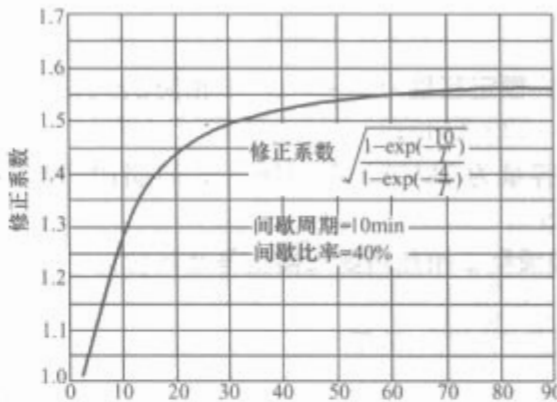


图 2.5-13 间歇工作制的修正系数

图 2.5-13 给出的修正系数是按 10min 为周期计算的，其中 4min 承受恒定负载，6min 为空载。

第6章 船用变压器

1 船用变压器的类型

1.1 概述

船用变压器是指安装于船舶或海洋平台上,能满足海洋气象条件和船舶或平台上特殊使用条件的变压器。

船用变压器使用条件不同于陆上,有较高的周围环境温度、较高的相对湿度、有霉菌、盐雾、油雾的影响及倾斜振动等情况。其产品结构设计与普通变压器不同,除用于电动机起动、电力推动的整流变压器外,所有船用变压器均应采用双绕组式,其初次级绕组间应无电的连接。

1.2 船用变压器分类

船用变压器分为浸渍型和树脂浇注型两种。

1.2.1 浸渍型船用变压器

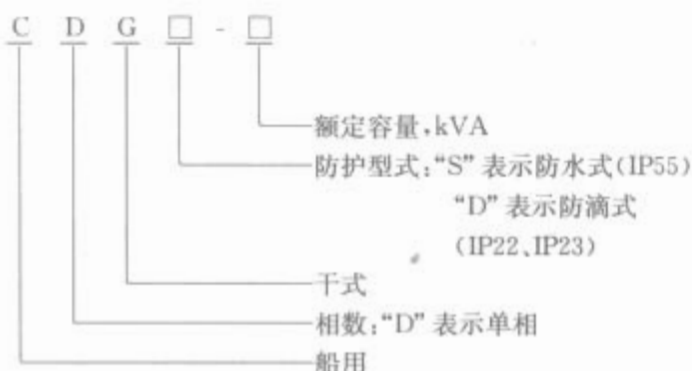
浸渍型船用变压器的绕组采用浸渍绝缘漆工艺,其绝缘等级可为B级、F级、H级。

1.2.2 树脂浇注型船用变压器

树脂浇注型船用变压器绕组采用带填料环氧树脂浇注而成,其绝缘等级为F级。

1.3 型号说明

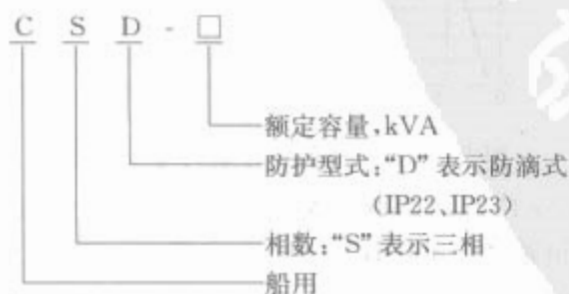
1.3.1 浸渍型单相船用变压器型号说明



示例: 额定容量为15kVA,单相防滴式的船用变压器的型号为: CDGD-15;

额定容量为5kVA,单相防水式的船用变压器的型号为: CDGS-5。

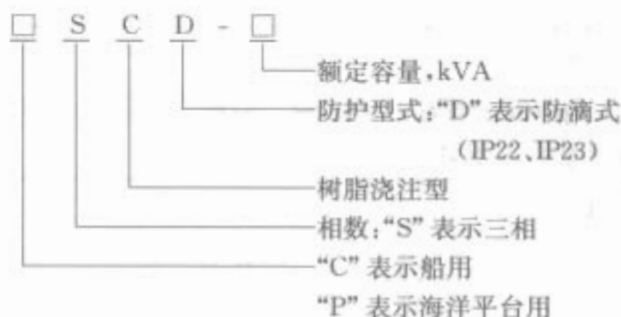
1.3.2 浸渍型三相船用变压器型号及其含义



示例: 额定容量为15kVA,船用三相变压器的型号为: CSD-15。

1.3.3 树脂浇注型船用变压器

树脂浇注型船用变压器型号及其含义如下:



示例: 额定容量为1600kVA,树脂浇注型船用三相变压器的型号为: CSCD-1600;

额定容量为1600kVA,树脂浇注型海洋平台三相变压器的型号为: PSCD-1600。

1.4 满足的标准

CB/T 1001—1992 《船用变压器》。

CB/T 3528—1993 《海洋平台变压器》。

1.5 使用条件

船用变压器在下列使用条件下应能正常运行:

- (1) 环境温度为 $-25^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 空气相对湿度不大于95%。
- (3) 有凝露、油雾、盐雾和霉菌的影响。
- (4) 有船舶或平台正常营运时产生的振动和冲击。
- (5) 船舶运行时摇摆角度为 22.5° 、倾斜角度为 15° 。

1.6 温升限值

船用变压器温升限值见表2.6-1。

表 2.6-1 船用变压器温升限值

部 位	绝缘等级			测量方法
	B 级	F 级	H 级	
线 圈	75℃	95℃	120℃	电阻法
铁心及结构零件表面	表面温升不得超过与其接触的绝缘材料的允许温升			温度计法

1.7 材料要求

- (1) 变压器的外壳应采用钢质材料(防水式允许不带金属外壳)。
- (2) 变压器所用的金属材料应具有耐腐蚀性能或是经过耐腐蚀处理的材料。
- (3) 变压器所用的绝缘材料应具有无毒、滞燃、防霉和耐潮性能或是经过相应处理的材料。

1.8 结构

1.8.1 铁心

船用变压器铁心采用冷轧取向硅钢片,船用单相变压器CDGS采用卷铁心结构,其余船用三相变压器均采用全斜接缝。

1.8.2 线圈

船用变压器线圈一般采用层式线圈。

1.8.3 外壳防护等级

船用变压器的外壳防护等级一般为 IP22 或 IP23。单相防水式的船用变压器防护等级为 IP55。

1.8.4 变压器的冷却方式

船用变压器一般为空气自冷型，容量≥500kVA 时可采用强迫风冷。

1.8.5 进出线

船用变压器的外壳上应设置供电缆进出的填料函。

容量≥500kVA 变压器进出线方式一般为下进下出。

1.8.6 接地

变压器一般应采用铜质接地螺钉，其直径应不小于 8mm，附近应有清晰耐久的接地标志。

2 船用特种变压器

船用电力推动用整流变压器是为了获得一定的整流直流

电压，变压器通常采用三绕组结构，其二次绕组分别接成星形和三角形，变压器阻抗电压较大。电力推动用整流变压器二次电流较大，而电压较低，常做成六相和十二相以获得脉动小的直流电压。

3 船用变压器的性能参数

3.1 船用单相变压器的性能参数

船用单相变压器的性能参数见表 2.6-2。

3.2 船用三相变压器的性能参数

船用三相变压器的性能参数见表 2.6-3。

3.3 海洋平台三相树脂绝缘变压器的性能参数

海洋平台三相树脂绝缘变压器的性能参数见表 2.6-4。

表 2.6-2 船用单相变压器的性能参数

额定容量 (kVA)	一次额定电压 (V)		二次额定电压 (V)		联结组标号	空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz					
0.5	400 230	450	230 115 40 25	230 115	Ii0	18	22	20	3.0
1						25	40	18	3.0
2						45	60	16	3.0
3						60	70	14	3.0
5						90	120	12	3.5
5	400 230	450	400 380 230 115	450 440 230 115	Ii0	90	120	15	2.5
7.5						155	195	13	2.5
10						150	250	13	2.5
15						160	310	10	2.4
20						210	350	10	2.2
25						260	420	10	2.2
30						310	530	10	2.2
35						435	535	10	2.2
40						455	610	9.0	2.0
45						460	680	8.0	2.0
50						485	725	8.0	2.0
60						500	810	5.0	2.0
75						520	950	4.0	2.0
100						550	1000	4.0	2.0

表 2.6-3 船用三相变压器的性能参数

额定容量 (kVA)	一次额定电压 (V)		二次额定电压 (V)		联结组标号	空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz					
3	400 230	450	400	450	Yyn0	80	105	14	3.5
5			380	440	Dd0	110	165	12	3.5
10			230	230	Dyn11	160	288	11	3.5
16			115	115	Yd11	210	370	10	3.5
20	400 230	450	400 380 230 115	450 440 230 115	Yyn0 Dd0 Dyn11 Yd11	230	480	8	3.5
25						250	528	7	3.5
30						280	600	6	3.5
40						290	680	5	3.5
50						300	1045	4	3.5
63						340	1250	4	3.5

续表

额定容量 (kVA)	一次额定电压 (V)		二次额定电压 (V)		联结组标号	空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz					
80	400 230	450	400	450	Yyn0	420	1450	3	3.5
100			380	440	Dd0	510	1840	3	3.5
125			230	230	Dyn11	925	2250	2.5	3.5
160			115	115	Yd11	970	2500	2.5	3.5

表 2.6-4 海洋平台三相树脂绝缘变压器的性能参数

额定容量 (kVA)	一次额定电压 (kV)	一次电压分接范围 (%)	二次额定电压 (kV)	联结组标号	空载损耗 (W)	负载损耗 (W)	空载电流 (%)	阻抗电压 (%)
200					860	2400	2.2	4.0
250					1000	2850		
315					1200	3400		
400					1350	4000	1.8	5.5
500					1600	4800		
630					1850	5600		
800					2100	6850		
1000					2450	8050	1.3	6.5
1250					2900	9700		
1600					3400	11 600		
2000					4600	14 000		
2500					5600	16 300		

3.4 其他规定

3.4.1 变压器的性能参数允许偏差范围

变压器的损耗、空载电流、电压比和阻抗电压的偏差应不超过表 2.6-5 中的规定。

表 2.6-5 变压器的损耗、空载电流、电压比和阻抗电压的偏差

项 目	允许偏差 (%)
空载损耗	+15
负载损耗	+15
总损耗	+10
空载电流	+30
阻抗电压	±10
电压比	±0.5 或阻抗电压的±10，二者取较小者

3.4.2 变压器的绕组电阻不平衡率

变压器的绕组电阻不平衡率，相间应不大于 4%，线间应不大于 2%。

3.4.3 变压器的绝缘电阻

(1) 船用变压器：一、二次绕组之间及一、二次绕组对地之间的绝缘电阻应不低于 50MΩ，在相当于额定负载条件下，热态绝缘电阻应不低于 5MΩ。

(2) 海洋平台变压器：绝缘电阻不低于 100MΩ。

3.4.4 变压器的外施耐压

(1) 0.5kV 级船用变压器：变压器的一、二次绕组之间及一、二次绕组对地之间因能承受工频 2500V（有效值）耐压试验 1min，而无击穿和闪络现象。

(2) 海洋平台变压器：按表 2.6-6 中规定。

表 2.6-6 海洋平台变压器

电压等级 (kV)	设备的最高电压 U_m (有效值) (kV)	额定短时工频耐受电压 (有效值) (kV)
≤1	≤1.1	3
3	3.5	10
6	6.9	20
10	11.5	28

3.4.5 变压器的感应耐压

变压器的变压器应能承受 2 倍额定电压、2 倍额定频率历时 1min 的感应耐压试验。

3.4.6 变压器的突发短路

(1) 船用变压器应能承受任何绕组端头短路时的热效应和机械效应历时 2s 而不致损伤。

(2) 海洋平台变压器、潜油电泵变压器的承受短路的能力。

变压器短路后线圈的平均温度 θ 的最大允许值见表 2.6-7。

表 2.6-7 变压器短路后线圈的平均温度 θ 的最大允许值

绝缘的耐热等级	θ (°C)
A	180
B	250
C	350
F 和 H	350

3.4.7 船用变压器的电压调整率

变压器的电压调整率是衡量变压器供电质量好坏的数据。当负载功率因素为 0.8（滞后）时应不超过 5%。

3.4.8 变压器的并联运行条件

变压器在下列条件下应能允许并联运行：①绕组联结组一致；②空载电压比相等（偏差在允许范围内）；③以百分数表示的阻抗电压比为 0.9~1.1，即它们的阻抗电压使每一台并联运行的变压器的实际电流偏差，不大于其额定电流的 10%；④当多台变压器并联运行时，其中最小变压器的额定容量不小于并联运行中最大变压器额定容量的一半。

3.4.9 变压器的过载能力应符合表 2.6-8 中之规定

表 2.6-8 变压器的过载能力

过载 (%)	时间 (min)
20	60.0
30	45.0
40	30.0
50	15.0
60	5.0
80	0.3

表 2.6-9 船用单相变压器的质量、外形及安装尺寸（防水式）

容量 (kVA)	长×宽×高 (mm×mm×mm)	安装尺寸 (长×宽) (mm×mm)	安装孔 (mm)	质量 (kg)
0.5	200×160×260	162×120	4×φ9	10
1	200×160×270	162×120	4×φ9	15
2	230×170×300	200×140	4×φ11	22
3	230×170×325	200×140	4×φ11	30
5	270×210×370	240×180	4×φ13	43

表 2.6-10 船用单相变压器的重量、外形及安装尺寸（防滴式）

容量 (kVA)	长×宽×高 (mm×mm×mm)	安装尺寸 (长×宽) (mm×mm)	安装孔 (mm)	质量 (kg)
5	465×325×510	350×215	4×φ12	75
7.5	490×335×580	370×225	4×φ12	85
10	495×345×590	380×235	4×φ12	100
15	535×375×630	410×240	4×φ14	140
20	575×400×690	460×265	4×φ14	190
25	585×410×730	470×275	4×φ14	195
30	605×430×750	490×295	4×φ14	270
35	625×430×750	510×295	4×φ14	275
40	635×440×770	520×305	4×φ14	290
45	635×440×780	520×305	4×φ14	300
50	665×460×830	530×325	4×φ14	320
60	665×470×850	530×350	4×φ18	395
75	665×470×910	530×350	4×φ18	450
100	720×500×990	550×380	4×φ18	510

表 2.6-11 船用三相变压器的重量、外形及安装尺寸

容量 (kVA)	长×宽×高 (mm×mm×mm)	安装尺寸 (长×宽) (mm×mm)	安装孔 (mm)	质量 (kg)
3	480×340×430	270×220	4×φ12	60
5	510×360×510	290×230	4×φ12	80
10	600×380×550	330×260	4×φ14	120
16	660×420×560	370×280	4×φ14	140
20	680×420×600	390×280	4×φ14	160
25	680×420×600	390×280	4×φ14	175

4 船用变压器重量、外形及安装尺寸

4.1 船用单相变压器（防水式）

船用单相变压器（防水式）见表 2.6-9。

4.2 船用单相变压器（防滴式）

船用单相变压器（防滴式）见表 2.6-10。

4.3 船用三相变压器

船用三相变压器见表 2.6-11。

4.4 海洋平台变压器

海洋平台变压器见表 2.6-12。

续表

容量 (kVA)	长×宽×高 (mm×mm×mm)	安装尺寸 (长×宽) (mm×mm)	安装孔 (mm)	质量 (kg)
30	750×420×680	410×310	4×φ14	185
40	800×430×710	460×340	4×φ14	250
50	820×460×730	470×340	4×φ14	270
63	820×460×730	470×340	4×φ14	285
80	860×480×870	510×350	4×φ18	380
100	940×540×920	510×350	4×φ18	400
125	990×570×990	560×430	4×φ22	560
160	1100×620×1030	620×440	4×φ22	610

表 2.6-12 海洋平台变压器的质量、外形及安装尺寸

容量 (kVA)	长×宽×高 (mm×mm×mm)	安装尺寸 (长×宽) (mm×mm)	安装孔 (mm)	质量 (kg)
200	1900×1300×1700	1200×1190	4×φ18	1250
250	1900×1300×1700	1200×1190	4×φ18	1400
315	1900×1300×1800	1200×1190	4×φ18	1450
400	2100×1450×1800	1400×1260	4×φ26	1650
500	2100×1450×1800	1400×1260	4×φ26	1950
630	2100×1450×1800	1400×1260	4×φ26	2500
800	2300×1540×2000	1600×1350	4×φ26	3000
1000	2300×1640×2000	1600×1450	4×φ26	3400
1250	2400×1640×2200	1600×1450	4×φ26	3500
1600	2400×1810×2200	1600×1620	4×φ26	4100
2000	2510×1810×2400	1800×1620	4×φ26	5500
2500	2510×1810×2400	1800×1620	4×φ26	6000

第3篇 船舶电站

主编单位：中国船舶重工集团公司第七〇四研究所
海军工程大学

中国船舶重工集团公司第七一二研究所
上海电器科学研究所(集团)有限公司

主 编：唐石青 王之杰 刘德志 郑克文 葛诗慧

编写人员：唐石青(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

王之杰(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

刘德志(海军工程大学)

郑克文(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)

葛诗慧(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

钟如森(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

程 军(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

朱永权(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

赵跃平(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

王硕丰(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

曹 爽(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

殷 非(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

胡 安(海军工程大学)

彭元亭(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)

钱志刚(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)

彭 澎(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)

郭 丽(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)

徐振球(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

华 渭(上海电器科学研究所(集团)有限公司)

由 滋(上海电器科学研究所(集团)有限公司)



第1章 概述

1 船舶电站的用途和分类

1.1 用途

船舶电站是产生电能并连续供应全船电能的设备，是船舶电力系统的核心部分。船舶电站运行的可靠性、经济性对保证船舶安全、经济航行具有重要意义。

1.2 功能分类

为保证在船舶的各种不同工况，如航行、作业、停泊、战斗、应急等情况下，船舶电站都能连续、可靠、经济、合理地进行供电，船舶上常常是用配置多种电站的方法来满足这一要求的。

船舶电站的种类有：

(1) 主电站，是正常情况下向全船供电的电站。

(2) 停泊电站，是单在停泊状态，无岸电供应时向停泊时的用电负载供电的电站，它容量较小。

(3) 应急电站，是在应急情况下，向为保证船舶安全所必需的负载供电的电站。

(4) 特殊电站或专用电站，如有的船舶需要专门 400~1000Hz 的中频电站供电给武备或导航设备，可能需要设置特殊电站或专用电站。

1.3 原动机类型分类

船舶电站是由原动机、发电机和附属设备（组合成发电机组）及配电板组成的，发电机组是把化学能转化为电能的装置，具有重要的作用。其中，带动发电机运转的原动机一般为柴油机、汽轮机或燃气轮机，相应的发电机组成为柴油发电机组、汽轮发电机组或燃气轮机发电机组。

柴油发电机组工作效率高，起动、停车、操纵使用方便，调速特性均匀，维护保养也容易，而且没有很多附属设备，因此是船舶最大量使用的发电机组，不仅用在以柴油机为动力装置的船上，而且也用在其他动力装置的船上。

汽轮发电机组也是船舶特别是采用蒸汽动力装置的船舶与舰艇上常用的发电机组，汽轮机转速均匀，调速特性好，体积小，蒸汽利用率高，由于转速高，使用中常通过减速齿轮箱与发动机相配合。但汽轮机需要设置包括锅炉在内的蒸汽系统、冷凝器等较多附属设备，其运行及维护方面技术要求高，快速性较差。近年来，利用主柴油机排气的废热，通过废气锅炉产生蒸汽以推动废气汽轮发电机组，也是节能的一种措施。

燃气轮机发电机组具有体积小、质量轻、功率大、起动停车容易等一系列优点，燃气轮机发电机组作为舰艇主动力装置正得到很大的发展，但燃气轮机发电机组除了在舰艇上得到应用外，在一般商船中尚未被作为主发电机组广泛推广使用。

2 船舶电站的组成

2.1 配置和组成设备

船舶电站主要由电源、配电装置和自动化监控装置组成。

电源是将机械能、化学能转变为电能的装置。船舶电源主要为发电机组。

配电装置是用来接收和分配电能的装置。它由各种开关、保护电器、测量仪表、调节和信号装置等电器设备按一定要求组合而成。船舶电站配电装置一般指船舶配电板。

而自动化监控装置则是用来实现机组自动起动、投网、调频调载、自动准同期并车、投切负载、重载询问、负载转移、自动停机和运行参数的控制、显示及故障监视处理的装置。

2.2 各组成设备间的接口关系

各组成设备间的接口关系见图 3.1-1。

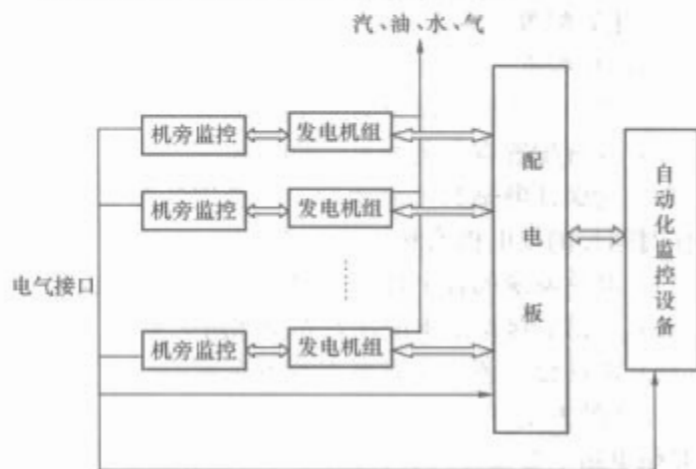


图 3.1-1 船舶电站组成设备接口关系图

3 船舶电站的设计

3.1 基本原则

根据船舶负荷的供电需求来确定电站的组成方案，并进行发电、配电和自动化设备的选型，这是电站设计的重要内容。

船舶电站包含的设备和器件很多，各类船舶对电站的功能和参数又各有各的要求，所以船舶电站一般都是专门设计、配套的。要使电站能满足船舶的总体要求，必须按照船舶用电设备对电能品质、用电总量和供电连续性的需求，进行电站系统的总体设计。系统设计要为船舶电站制订最合适的方案，确定船舶电力系统设备的选型原则，协调设备相互间的接口关系，并提出电站的技术性能要求，促使各项设备都能纳入系统的统一轨道。

一个设计合理的船舶电站应满足以下要求：

(1) 具有充足的发电能力，可以保证向全船的用电负荷可靠的供电。

(2) 具有较强的生命力,可以在船舶供电网络或相关舱室受损时,仍能保证向船舶重要用电负荷供电。

(3) 具有较低的全寿命期费用,并较容易实现日常的维护保养。

(4) 具有较高的运行安全性,在任何情况下,可以保证操作者和设备的安全。

(5) 便于安装建造,具有优良的操作使用性能。

各类船舶电站设计遵循的基本要求和原则:

(1) 船舶电站的发电量应该保证满足船舶在各种工况下所有负荷的供电要求。

(2) 电站设计应当使得只需一台主发动机运行就可保证船舶上最大负荷的顺利投入运行。

(3) 船舶设置单一主电站时,应配置备用发动机,以保证发电机组发生故障或平时维修保养的机动性。

(4) 为保证船舶因添置新设备或后期改装而增长的电力需求,电站应考虑一定的容量储备。

(5) 舰艇或要求较高的舰船应设置多个电站。

(6) 舰艇或要求较高的舰船电站应考虑生命力功率储备。

(7) 电站设计应努力提高发电设备在各种工况下的利用率。

(8) 根据船舶的特点和推进动力装置的类型合理选择发电机组。

(9) 船舶电站应尽可能减少发电机组的品种。

(10) 根据船舶的自动化水平和运行管理的要求,确定电站自动化的配置方案,并在可靠工作的前提下,不断提高电站的自动化程度。

(11) 努力改善发电设备的操作条件。

(12) 合理配置应急电站和辅助电站。

(13) 为保证电站的可靠运行,应选用性能优良、无故障工作时间长的发电机组和控制设备。

(14) 电站系统的各个环节应配备适当的保护措施。

(15) 电站的接岸供电应注意安全和防火要求。

(16) 电站设计还应注意电力设备布置的合理性和船厂建造、安装的方便性。

船舶电站主要设计内容包括:

(1) 船舶电站总体性能设计。

(2) 发动机组成套设计。

(3) 发动机组并联运行性能设计。

(4) 发动机组保障系统设计。

(5) 船舶电站保护系统设计。

(6) 船舶电站主配电板设计。

(7) 电站自动化装置设计。

3.2 船舶电站的参数和指标

船舶电站的主要基本参数包括电制、电压及频率。

3.2.1 电制

电能能在船上应用已有近百年历史,在本世纪50年代以前建造的船舶,基本上以直流电制为主。因为在当时的技术条件下,采用直流电有明显的优越性,主要是直流容易满足甲板机械关于速度控制的要求,直流电动机起动冲击小,可以实现大范围内平滑调速;直流发动机调压、并车简单;直流配电装置中开关电器及仪表等也均较交流配电装置简单;蓄电池可直接由电源充电,省去了整流器等。虽然直流有诸多优点,但是直流电制在工作的可靠性、经济性、维护保养方便、质量及尺寸等方面都远不如交流电制优越。随着船舶

电气化程度的不断提高,船舶电站容量日益增加,直流电制的固有缺陷也日益突出,明显的例子就是直流电不宜于变换电压,由220V再提高困难,这样势必增大大功率电力系统的造价和损耗。再者,自20世纪50年代以后,由于电子工业的迅速发展,大功率半导体元件、器件的生产,成功地解决了曾经阻碍船舶电站交流化的一系列难题(调速、调压、并车、调频、调载等),从而使交流电制得到飞速发展,仅用了10年左右的时间,在20世纪50年代末即奠定了交流电制在船舶上的主导地位。近年来,除了某些特种工程船舶仍采用直流电制或交、直流混合电制外,几乎所有大、中型船舶都采用交流电制。

3.2.2 电压

船舶电站的电压等级一般都尽可能与岸电相同,我国的船舶上,用电设备额定电压有24V、110V、220V、380V、1kV、3kV、6kV、10kV等。发动机额定电压一般应比相同电压等级的受电设备高5%,我国规定为115V、230V、400V、3.15kV、6.3kV、10.5kV等。

3.2.3 频率

交流配电系统的标准频率为50Hz(60Hz)。

表3.1-1为I型舰船交流电力系统电力品质的界面特性和接口参数。

表 3.1-1 I 型舰船交流电力系统电力品质的界面特性和接口参数表

电 能 品 质		I 型
电压	(1) 用电设备标称电压(有效值)	380V 或 220V
	(2) 用电设备电压允差	
	(a) 三相线电压的平均值允差	±5%
	(b) 包括(2)(a)和(3)项的任一 线电压容差	±7%
	(3) 线电压不平衡允差	3%
	(4) 电压的周期性变化允差	2%
	(5) 瞬态电压	
	(a) 瞬态电压允差	±16%
波形	(b) 瞬态电压恢复时间	2s
	(6) 尖峰电压(峰值)	2500V(对 380V 系统)
	(7) 瞬态或故障情况除外,由 (2)(a)和(4)项组合引起的与用电 设备标称电压的最大偏离	±6%
	(8) 故障情况除外,由(2)(a)、 (4)和(5)(a)项组合引起的与用电 设备标称电压的最大偏离	±20%
	(9) 正弦性畸变率	5%
	(10) 最大的单次谐波含量	3%
	(11) 偏离系数	5%
	(12) 标称频率	50Hz
频率	(13) 频率允差	±3%
	(14) 频率的周期性变化允差	0.5%
	(15) 瞬态频率	
	(a) 瞬态频率允差	±4%
	(b) 恢复时间	2s
	(16) 故障情况除外,由(13)、 (14)和(15)(a)项组合引起的与标 称频率的最大偏离	±5.5%

3.3 成套性设计

船舶电站成套是通过电站整体功能、接口设计和协调,将符合设计要求的组成设备进行拼装、调试和检验,以满足船舶供电需求,最终以电站整体向用户供货的技术。电站成套的重要性在于船舶电站的总体性能是由其组成的各个重要设备的性能所决定的,它们在外观上相互独立,但却存在着众多相互关联的内在性能,如果不进行整体的电站成套设计,各组成设备是无法单独提供给用户一个具有完整功能和性能的船舶电站的。因为用户需要的是对船舶进行稳定、可靠供电的配套装置。对单个设备而言,他无法把握船舶对整体电站的需求,也就无从把握电站对自己设备的技术要求和接口要求,也将无法与其他设备进行配合工作。而且从单个设备出发,它也无法验证该设备置于整体电站后能否满足整体的功能需求。电站成套设计起到的作用相当于为船东提供船舶电站整体解决方案。船舶电站成套设计的主要技术关键为:

- (1) 船舶电站各组成设备性能参数的协调性设计。
- (2) 船舶电站各组成设备间接口界面的协调性设计。
- (3) 船舶电站操作部位和自动化功能的协调性设计。
- (4) 船舶电站功能及性能参数的验证方法设计。

3.4 电站保护设计

船舶电站的保护设计是通过适当的方法和措施,提高船舶电站在非正常使用或故障情况下,船舶电站的运行安全性和自愈能力,保障船舶电站的供电连续性。

3.4.1 一般要求

(1) 船舶电站的保护设计应选用合适的保护装置来保护发电机组、电缆、汇流排以及有关电气设备免遭包括短路在内的系统高低阻抗故障的损坏。

(2) 船舶电站的保护设计应尽可能缩小系统保护的盲区。

(3) 船舶电站各保护装置应做到反应灵敏,动作迅速、准确、可靠并具有符合逻辑的选择性。

(4) 船舶电站的保护设计在同样能满足系统保护要求的前提下,应尽可能简化保护方案和选用简单的保护装置。

(5) 船舶电站各保护装置的选择、布置和性能应构成一个具有以下特性的完整和协调的自动保护系统:

- 1) 在各种故障状态下,通过保护装置的选择性分断作用,保持对非故障电网的连续供电。
- 2) 对于高阻抗故障,通过电气设备的热特性与有关保护装置分断特性的协调来获得设备受保护情况下的最大限度的连续供电。

3) 对于低阻抗故障,能够有选择地、迅速地将故障部分予以切除,以减少对系统和设备的危害。

(6) 船舶电站的保护设计对于各种类型的故障,在故障出现到相应保护装置动作的时间段内,故障电流所形成的电动应力和热效应不会造成保护装置本身及所有有关的电气设备和电缆的损坏。

3.4.2 保护装置的选择

(1) 若选用断路器来提供保护,则此断路器应能分断所在电路的所有绝缘极。若选用熔断器来提供保护,则应在所在电路的每一个绝缘极上均设置一个熔断器。

(2) 保护装置的电压额定值应不小于其所在电路的交流线间电压最大有效值。

(3) 保护装置(断路器过电流检测器)的额定电流值应

等于或近似等于但不小于可能流经该保护装置的总的最大持续负荷电流。

(4) 对于设置在电站基本网络中的所有保护装置(对于岸电保护装置系指塑壳式自动空气断路器与熔断器的组合,见3.4.4条),其分断能力应不低于相应安装点的最大预期对称短路电流的有效值。(当时及短路网络的功率因数低于保护装置额定分断能力所对应的功率因数时,则应按相关船级社的计算方法换算出保护装置实际分断能力。)

(5) 所有可能接通短路点的断路器,其接通能力应不低于相应安装点的预期短路电流的最大峰值。

(6) 用作过载保护的断路器,应具有与其保护对象的过载能力以及系统的选择性要求相适应的(脱扣时间——过电流)脱扣特性。

3.4.3 短路电流的计算

(1) 交流电力系统的短路电流及短路网络功率因数的计算方法应符合相关船级社计算方法的规定。

(2) 在缺乏有关参数的情况下,主汇流排近旁的短路电流可以取为满足最大用电需要的可能向短路点馈送短路电流的所有并联运行发电机总额定电流的10倍,加上需同时运行的所有电动机额定电流的3倍(对称分量有效值)。短路网络的功率因数取为0.10。

3.4.4 大容量电站的保护

(1) 发电机电路的保护装置:

1) 在发电机电路上应选用框架式自动空气断路器来实施保护(通常将这类断路器称为发电机断路器)。

2) 应利用框架式自动空气断路器的长延时脱扣特性来防止过载情况下发电机以及发电机电缆温度的过分升高。

根据发电机组的配置及工作情况,长延时脱扣的始动电流整定值可取为发电机额定电流的110%~150%的标准整定值。

长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。

3) 应利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来保护发电机免遭低阻抗故障的损害,并对主汇流排跨线断路器、应急汇流排跨线断路器、汇流排馈线断路器以及馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。

短延时脱扣的始动电流整定值应 \leq 发电机稳态短路电流的80%。

短延时脱扣的延时时间应大于该断路器之后任意通往用电负载的与之串联的下一级断路器的短延时和分断时间之和,通常可取为短延时脱扣的最长延时时间段。

4) 当被保护的发电机可能与两台及两台以上发电机并联运行且与之并联运行的发电机容量足够大时,应利用框架式自动空气断路器的瞬时脱扣特性来选择性地分断特大短路电流,以防止与之并联的发电机断路器的不合理分断。

瞬时脱扣的始动电流整定值应 \geq 被保护发电机的最大非对称短路电流的120%。

5) 对并联运行的每一台发电机均应提供逆功率保护,通过逆功率继电器与发电机断路器分励脱扣器的配合,当逆功率值达到被保护发电机额定功率的8%~15%(针对柴油发电机组)或2%~6%(针对汽轮发电机组)或3%~7%(针对燃气轮发电机组)时,应延时3~10s分断被保护的发电机断路器。

当供电电压下降至额定电压的50%时,逆功率继电器不应失效,但其动作值可以有所改变。

6) 对于容量大于或等于1000kVA的发电机,除了上述的断路器保护外,还应设置发电机内部故障保护以及发电机至配电板汇流排的连接电缆免受损失的保护。

(2) 主汇流排跨接电路的保护装置:

1) 在主汇流排跨接电路上应选用框架式自动空气断路器来实施保护(通常将这类断路器称为主汇流排跨线断路器)。

在主汇流排跨接电缆的两端应各设一个主汇流排跨线断路器。

2) 应利用框架式自动空气断路器的长延时脱扣特性来保护主汇流排跨接电缆以及有关的主发电机免遭过载和高阻抗故障的损害。

3) 对于主汇流排跨接电缆所跨接的每一主配电板汇流排上只接有一台发电机的情况,主汇流排跨线断路器的长延时脱扣的始动电流整定值应满足下列要求:

—— \leq 主发电机断路器长延时脱扣始动电流整定值的80%。

—— \geq 汇流排馈线断路器或馈线断路器长延时脱扣始动电流整定值的120%。

—— \geq 流经该断路器的总负载电流的150%。

长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。

对于主汇流排跨接电缆所跨接的主配电板汇流排上接有两台或两台以上发电机的情况,主汇流排跨线断路器的长延时脱扣的整定方式应根据具体情况而定。

4) 应利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除主汇流排跨接电路以及有关主汇流排上的所有低阻抗故障,并对主汇流排馈线断路器以及馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。

对于主汇流排跨接电缆所跨接的每一主配电板汇流排上只接有一台发电机的情况,主汇流排跨线断路器的短延时脱扣的始动电流整定值应 \leq 主发电机断路器短延时脱扣始动电流整定值的80%。

对于主汇流排跨接电缆所跨接的主配电板汇流排上接有两台或两台以上发电机的情况,短延时脱扣的始动电流整定值应 \geq 断路器本身的过电流检测器额定电流的150%。

短延时脱扣的的延时时间应大于该断路器之后任一通用电负载的与之串联的下一级汇流排馈线断路器或馈线断路器的短延时和分断时间之和,通常该延时时间段应小于主发电机断路器短延时脱扣的延时时间段。

5) 对用于主汇流排跨接电路的框架式自动空气断路器通常不提瞬间脱扣要求。如该断路器设有瞬间脱扣装置,则该瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

6) 主汇流排跨线断路器应具有足够的短时额定值,以保证它与汇流排馈线断路器及馈线断路器之间的选择性保护。

(3) 应急汇流排跨接电路的保护装置:

1) 在应急汇流排跨接电路上一般应选用框架式自动空气断路器来实施保护(通常将这类断路器称为应急汇流排跨线断路器)。

在应急汇流排跨接电缆的两端应各设一个应急汇流排跨线断路器。

2) 应利用框架式自动空气断路器的长延时脱扣特性来保护应急汇流排跨接电缆以及有关的主发电机免遭过载和高阻抗故障的损害。

长延时脱扣的始动电流整定值应满足下列要求:

—— \leq 主发电机断路器长延时脱扣始动电流整定值的80%。

—— \geq 应急配电板馈线断路器长延时脱扣始动电流整定值的120%。

—— \geq 流经该断路器的总负载电流或应急汇流排跨接电路的额定电流的150%。

长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。

3) 应利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除应急汇流排及其跨接电路上的所有低阻抗故障,并对应急汇流排馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。

短延时脱扣的始动电流整定值应满足下列要求:

—— \leq 主发电机断路器短延时脱扣始动电流整定值的80%。

—— \geq 应急汇流排上任一馈线塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣始动电流整定值的120%。

短延时脱扣的延时时间段应小于主发电机断路器短延时脱扣的延时时间段。

4) 对用于应急汇流排跨接电路的框架式自动空气断路器通常不提瞬间脱扣要求。如该断路器设有瞬间脱扣装置,则该瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

(4) 停泊汇流排跨接电路的保护装置:

1) 在舰船的停泊汇流排跨接电路上一般应选用框架式自动空气断路器来实施保护(通常将这类断路器称为停泊汇流排跨线断路器)。

在停泊汇流排跨接电缆的两端应各设一个停泊汇流排跨线断路器。

2) 应利用框架式自动空气断路器的长延时脱扣特性来保护停泊汇流排跨接电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。

长延时脱扣的始动电流整定值应大于或等于流经该断路器的总负载电流或停泊汇流排跨接电路的额定电流的150%。

长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。

3) 应利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除停泊汇流排跨接电路及有关主汇流排上的所有低阻抗故障。

短延时脱扣的始动电流整定值应小于或等于停泊发电机断路器短延时脱扣的始动电流整定值的80%。

4) 对用于停泊汇流排跨接电路的框架式自动空气断路器通常不提瞬间脱扣要求。如该断路器设有瞬间脱扣装置,则该瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

(5) 汇流排馈线电路的保护装置:

1) 在汇流排馈线电路上一般应选用框架式自动空气断路器来实施保护(通常将这类断路器称为汇流排馈线断路器)。

汇流排馈线断路器应设置在汇流排馈线电路的主汇流排侧。

2) 应利用框架式自动空气断路器的长延时脱扣特性来保护汇流排馈线电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。

长延时脱扣的始动电流整定值应满足下列要求:

—— \leq 主汇流排跨线断路器长延时脱扣始动电流整定值的80%。

—— \geq 流经该断路器的总负载电流的150%。

长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。

3) 应利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除汇流排馈线电路以及所接负载中心汇流排上的所有低阻抗故障,并对所接负载中心馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。

短延时脱扣的始动电流整定值应满足下列要求:

—— \leq 主汇流排跨线断路器短延时脱扣始动电流整定值的80%。

—— \geq 该断路器之后任一通往用电负载的与之的串联下一级馈线塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣始动电流整定值的120%。

短延时脱扣的延时时间段应大于上述馈线塑壳式自动空气断路器的分断时间,通常该时间段应小于汇流排跨线断路器短延时脱扣的延时时间段。

4) 对用于汇流排馈线电路的框架式自动空气断路器通常不提瞬间脱扣要求。如该断路器设有瞬间脱扣装置,则该瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

5) 汇流排馈线断路器应具有足够的短时额定值,以保证它与负载中心馈线断路器之间的选择性保护。

(6) 岸电馈线电路的保护装置:

1) 在岸电馈线电路上一应选用带熔断器的塑壳式自动空气断路器或塑壳式自动空气断路器加熔断器来实施保护(通常将这类保护装置称为岸电保护装置)。

岸电保护装置应设置在岸电箱中。

2) 应利用塑壳式自动空气断路器的反时限过电流脱扣特性来保护岸电馈线电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。

反时限过电流脱扣器的始动电流整定值应等于或稍大于在正常情况下可能流经该断路器的最大岸电供电电流。

3) 应利用塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣特性和熔断器的熔断特性来迅速排除岸电馈线电路、有关的汇流排、汇流排跨接电路及汇流排馈线电路上的所有低阻抗故障。

瞬时脱扣的始动电流整定值应为所选断路器的最大瞬时脱扣整定值。

4) 岸电保护装置中所用的熔断器应选用高断流容量的熔断器,以起到对塑壳式自动空气断路器的后备保护作用。熔断器和塑壳式空气自动断路器的时间—电流特性应能相互匹配,以避免熔断器不必要的熔断和保护塑壳式自动空气断路器不受损坏。塑壳式自动空气断路器应能满意地分断熔断器熔断电流以下的所有故障电流。在塑壳式自动空气断路器正常分断时,熔断器应不会熔断、损坏或改变其保护特性。熔断器应在塑壳式自动空气断路器的任何损坏之前切断故障电流,故障电流切断后,未熔断的熔断器应保持其原来的特性。

5) 如果要求船舶电站通过岸电馈线电缆和岸电箱向他船或岸上的用电负载供电时,应在船舶电站设计中予以明确,并应满足下列要求:

a. 若要求向他船或岸上的供电功率大于船舶本身靠岸工况的用电功率时,岸电保护装置中塑壳式自动空气断路器反时限过电流脱扣器的始动电流整定值以及岸电馈线电缆均应与要求的最大供电电流相适应。

b. 应在岸电馈线电路的船舶电源侧设置一个合适的断路器。如果要求向他船或向岸上的供电功率较大,则可采用框架式自动空气断路器,并按汇流排馈线断路器的整定方

式进行整定;如果要求向他船或向岸上的供电功率较小,则可采用塑壳式自动空气断路器,并按岸电保护装置中的塑壳式自动空气断路器的整定方式进行整定。

c. 如果为了防止船上的发电机与岸电并联而采取了将发电机断路器与岸电馈线电路中的断路器互相连锁的措施,则应设置解除这种连锁的装置。

(7) 根据需要还可在岸电箱内设置断相保护和欠电压保护。

若设有断相保护,则应在发生一相(或两相)断电时,延时分断岸电供电电路,延时时间应不大于1min。

若设有欠电压保护,则应在供电电压下降到其额定电压的70%~35%时,瞬时分断岸电供电电路,并且当供电电压低于额定电压的35%时,应能阻止合闸供电;当供电电压大于其额定电压的85%时,应能保证接通供电。

(8) 仪表、指示灯、抗干扰电容器和控制电路的保护:

1) 电压表、测量仪表的电压线圈、接地指示装置、指示灯以及它们的连接导线应用熔断器加以保护。

2) 由汇流排及发电机电路直接引出的控制及仪表用绝缘电线,应于最接近接地点处以熔断器加以保护。

3) 配电板和发电机电路中如果装有抑制电磁干扰的电容器,则电容器电路中应设置适当规格的熔断器。

3.4.5 小容量电站的保护

3.4.5.1 发电机电路的保护装置

(1) 在发电机电路上可选用塑壳式自动空气断路器来实施保护。

(2) 应利用塑壳式自动空气断路器的反时限过电流脱扣特性来保护发电机以及发电机电缆温度的过分升高。

反时限过电流脱扣器的始动电流整定值应等于或稍大于发电机的满载电流。

(3) 当被保护的发电机可能与两台或两台以上发电机并联运行,且与之并联运行的发电机容量足够大时,应利用塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣特性来迅速排除发电机断路器的发电机一侧的低阻抗故障。

瞬时脱扣的始动电流整定值应大于或等于被保护发电机的最大非对称短路电流的120%。

(4) 对并联运行发电机的逆功率保护,应符合3.4.4条(1)款的规定。

3.4.5.2 主汇流排跨接电路的保护装置

(1) 在主汇流排跨接电路上可选用塑壳式自动空气断路器来实施保护。

主汇流排跨线断路器的设置位置应符合3.4.4条(2)款的规定。

(2) 应利用塑壳式自动空气断路器的反时限过电流脱扣特性来保护主汇流排跨接电缆以及有关的主发电机免遭过载和高阻抗故障的损害。

过电流脱扣器的始动电流整定值应等于或稍大于可能流经该断路器的总的负载电流。

(3) 应利用塑壳式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除主汇流排跨接电路以及有关汇流排上的所有低阻抗故障,并对馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。

短延时脱扣的始动电流整定值应小于或等于主发电机稳态短路电流的90%。

短延时脱扣的延时时间应超过任一馈线断路器的分断时间。

如因条件所限确实难以执行本条上述规定,则应征得使

用方的同意。

3.4.5.3 停泊汇流排跨接电路的保护装置

(1) 在停泊汇流排跨接电路上可选用塑壳式自动空气断路器来实施保护。

停泊汇流排跨线断路器的设置位置应符合 3.4.4 条 (4) 款的规定。

(2) 应利用自动空气断路器的反时限过电流脱扣特性来保护停泊汇流排跨接电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。

反时限过电流脱扣器的始动电流整定值应等于或稍大于可能流经该断路的总的负载电流。

3.4.5.4 岸电馈线电路的保护装置

岸电馈线电路上的保护装置应符合 3.4.4 条 (6) 款的规定。

3.4.5.5 仪表、指示灯、抗干扰电容器和控制电路的保护

仪表、指示灯、抗干扰电容器和控制电路的保护应符合 3.4.4 条 (7) 款的规定。

3.5 安全性设计

(1) 船舶电站的电气设备不带电金属部位必须可靠接地, 机上敷设的电缆应采取机械防护措施。

(2) 带电部位在人能触及的表面必须具有良好的绝缘防护层, 控制设备内部带高压部位有醒目标志提示维修人员注意。

(3) 封闭设备通风孔等部位有防护措施, 阻止鼠等小动物进入造成电气短路事故。

(4) 在有转动、高温、高压等能危及人体安全部位必须有醒目标志, 并有一定隔离措施。

(5) 系统内设备所选用电线电缆以及其他橡胶制品等必须具有阻燃性能。

(6) 系统内设备对有可能危及人体和设备安全的因素必须有充分的预计, 并采取有效的安全防护手段避免事故发生或防止事故扩大。

3.6 可靠性设计

(1) 寿命剖面。船舶电站的寿命剖面应与全船的寿命剖面相适应, 电站内设备的小修和大修应与船舶的小修和大修相配合。电站的寿命剖面的环境条件应略别于船舶总体, 考虑指定舱室的环境条件。

(2) 任务剖面。船舶电站的任务剖面应与船舶的使命和任务相关联, 在任务剖面内应考虑电站的各种运行方式和各种工作状态 (包括自动的和非自动工作状态)。

(3) 定量要求。船舶电站可靠性定量要求由使用可用度 A_0 、固有可用度 A_i 、任务可靠度 R_M 和平均故障间隔时间 MTBF 予以表征。

(4) 定性要求。船舶电站可靠性定性要求应体现耐用性、低故障, 主要包括:

- 1) 系统保护与连锁。
- 2) 强度安全系数应符合要求。
- 3) 根据设备在船舶上的位置, 充分注意到环境温度热影响的后果。
- 4) 重要的控制回路应考虑硬件上的冗余。
- 5) 充分注意到控制软件的可靠性。

3.7 电站的自动化设计

现代船舶具有多台发动机组, 其原动机形式也多样化, 它们均各有各的自动控制单元, 整个电站也还有其他的控

制单元。不同工况运行时, 有时可能是单机供电, 有时需要多机组并联供电。在这种情况下, 要满足无人机舱的要求就必需对电站的运行自动化有一个总体的规划, 实现总体的逻辑控制, 也就是说, 在多机组构成的电站中, 按一定的逻辑, 将各个自动控制单元有机地组合起来, 使船舶电站能成为一个对外界环境 (如机、电的随机故障、供电能力及负荷的随机变化等) 具有最佳应变能力的自动电站。尽可能保证安全、可靠、经济、优质、连续的供电。

作为全自动化的电站, 整个自动化系统控制的作用大致应考虑如下各项功能:

- (1) 发动机组操作方式的选择。
- (2) 备用机组“备用顺序”安排。
- (3) 起动指令和增机条件。
- (4) 空气断路器的合闸。
- (5) 负荷分配和电力系统电压和频率调节。
- (6) 解列控制。
- (7) 空气断路器的分断。
- (8) 停机。
- (9) 重载询问。
- (10) 次要负荷自动分级卸载。
- (11) 重要负荷分级自动起动。
- (12) 模拟试验、自检及其他。

为了提高不断增加功率的船舶电站供电可靠性, 随着船舶向大型化、高速化和自动化方向发展, 自 20 世纪 60 年代以来, 对船舶电站提出了自动化要求。船舶电站自动化的好处有: 维持电站供电的连续性和提高可靠性, 增强船舶运行的生命力; 提高船舶电站供电质量, 使所有用电设备处于良好工作状态; 便于及时发现和排除故障, 改善船员劳动条件, 减轻值班强度, 使船员能有更多的时间和精力从事设备维修工作; 减少船员, 提高劳动生产率, 提高船舶运行的经济指标。现代船舶的电站自动化系统一般都由监控、安全、控制几部分组成, 在电站的总体设计中应对以下几个问题特别关注。

3.7.1 操作部位的连锁和转换

3.7.1.1 操作部位的划分和关系

电站控制和监控系统的操作部位可划分为机旁、主配电板和集控台三级, 并应符合机旁优先于主配电板, 主配电板优先于集控台的优先关系, 而且在机旁应具有机械或电气的方法闭锁集控和主配电板操作的连锁机构或环节。

3.7.1.2 操作部位的转换

电站控制和监控系统中的各操作部位之间, 在被控设备正常运行或发生故障时, 实施控制部位的转换, 转换的时间一般应不大于 3s; 控制部位转换时, 不允许引起电站系统各设备运行状态的严重变化。机旁和集控之间的转换只能在机旁进行。

3.7.2 控制系统

(1) 控制系统应保证能在电站系统运行的任意状态下, 启动或停止控制系统, 而不至对电站系统运行造成不利的影响。

(2) 控制系统应独立于安全系统和监测系统。

(3) 控制系统的功能应能进行模拟自检和运行检查。

(4) 控制系统的功能详见本篇第 6 章《船舶电站的监测与控制》。

3.7.3 监测报警系统

(1) 监测报警系统应尽可能独立于安全系统和控制系统。当安全系统和控制系统发生故障时, 不应影响监测报警

系统的正常工作。

(2) 监测报警系统应设有自检功能,当监测报警系统自身发生故障时,应能进行报警,或进行故障定位指示或代码显示。自检对象有:传感器、测量板、声光报警设备、计算机软件 and 硬件。

(3) 监测报警系统可以具有打印参数功能,将超限参数即时打印;根据需要还可打印有关被检参数,或人工设定打印点,对被检参数实时打印。打印内容应包括参数值和测试时间、检测点的编号。对于超限参数,应采用标记或不同颜色手段以明显区别正常值参数。

(4) 显示和报警。监测报警系统在集控台上的显示和报警项目详见本篇第6章《船舶电站的监测与控制》。

3.7.4 安全系统

(1) 对发电机组而言,安全装置至少在下列两方面设置安全保护:

- 1) 机组超速时。
- 2) 机组的滑油压力极低时。

机组应在安全装置(或系统)控制下紧急停机。

(2) 对设置电站控制和监测系统的自动化电站应设置安全系统。

(3) 当电站控制和监测系统在运行过程中发生危及电站系统内各主要设备的严重故障时,安全系统应能自动产生保护性动作:

1) 立即停止运行,如运行机组紧急停车,紧急切断该设备的控制系统等,除非人工复位,该设备不允许投入工作。

2) 把该设备暂时调节到可以勉强运行状态,如卸除机组的负载,断开主发电机开关(或断路器等)。

当安全系统动作时,应在对应的机旁信号采集站或控制柜(台)上发出声光报警。并显示安全系统的动作原因。

3.8 技术发展趋势

船舶电站的设计通常是以船舶总体设计的设想和总体对各系统的要求为依据的,故船舶总体的发展趋势必然会对船舶电站提出更高的希望和要求。随着历年来船舶吨位的增大、电气化程度的提高和科学技术的发展,船舶电站亦有显著的进步和变化。

(1) 船舶电力系统的发电功率逐年增大。国外军用舰艇中,护卫舰由早期的2000kW增大到近期的4000kW,驱逐舰由早期的2000kW增大到近期的9000kW,巡洋舰由早期的4000kW增大到近期的64000kW。

民用船舶中,油船由早期的1200kW增大到近期的2000kW或更大,集装箱船由早期的4500kW增大到近期的6000kW,货船由早期的1200kW增大到近期的2500kW或更大。

(2) 电站的设备性能和供电指标有很大的提高。现代船舶电站的设计以最大限度的维持不间断供电为目标。由于船电技术的发展,船舶电力设备的制造已日趋完善,不仅能为船舶提供完整的发电机组系列、性能优良的各种容量自动开关和监视保护设备,而且船电设备的功能也有显著的提高。发电机的快速调压调频设备提高了电力系统的静态和动态性能指标,同时也加强了系统承受各种突然负载的能力。近年来,在某些船舶上又出现了大功率、高电压的高参数电力系统。虽然目前这种系统还限于大型船、工程船等特种船舶,但电力系统的高参数在船舶上的应用是技术上的一种突破,它为未来船舶电站的发展开辟了道路。

(3) 电站实现集中控制和自动化。电站的自动化是船舶自动化的一个组成部分,这也是船舶现代化的一个重要标志,自动化技术的广泛应用,充分发挥了电力设备的潜在功能,并使船员的操作强度大大下降,船员的数量减少。此外,自动化可以实现系统的最佳运行方式,提高了设备运行的效率、经济性和安全性。

近年来,船舶监控系统技术得到了快速发展,已从早期的以单片机系统和PC机系统为核心的分布式控制系统(DCS)演变成为以工业以太网、工业现场总线、智能图像监控终端、现场数据采集终端等嵌入式网络设备为核心的新型船舶监控系统。这种综合平台式的电站管理系统将使整个船舶电站的控制、操作、综合管理、维护等工作效率大大提高,具有高度开放性、可靠性、可维性与耐用性。船舶电站监控系统的发展方向是逐渐向标准化、模块化、系列化、开放化、小型化、网络化、信息化、人机交互人性化等方向发展。

(4) 在船舶电站中广泛采用各种新技术。科学技术的发展也逐步改变了船舶电站的面貌。近年来电站控制线路的电子化程度有很大的提高,半导体和集成电路普遍代替了电磁、机械、液压等控制部件,出现了电子固态保护装置、电子调速器等性能更优越的新型部件。大功率半导体技术促使电能变换设备趋向静止化,从而提高了系统运行的性能,减小了电力设备的体积和质量。此外,设备电子化的结果,推行了便于生产装配和维修保养的标准部件和插件方式的应用,提高了生产效率,缩短了设备的维修时间。

(5) 电站设备趋向于小体积、长寿命、无污染。伴随着电气元器件的集成化、原材料性能的提高和机械加工精度的上升,现在的设备都趋向更小的体积和更长的寿命。例如柴油发电机组,原来提供1000kW的机组尺寸要达到5160mm×2000mm×2500mm,而现在能提供3000kW的机组尺寸也才8350mm×2800mm×3650mm,功率密度得到了大幅提高。在使用寿命方面,以前的柴油机大修期仅为3000h、6000h不等,而现在可延长至12000h到18000h,甚至可以更长。在环境保护方面,现在越来越多的国家、地区对柴油机运行排放的废气含量(例如NOX)都作出了详细的规定。在有些邮轮上还对机组的噪声作出了规定。在设备内部和设备之间的用料(例如绝缘材料)方面,也强调了无毒无害等指标。

4 船舶电站的成套和试验

4.1 成套目的和任务

船舶电站成套一般是通过电站的陆上成套对电站系统的各主要设备和它们之间的接口及协调特性进行试验验证,使电站的整体特性满足规定的要求。

船舶电站的成套的主要任务是在陆上模拟船舶使用条件,对船舶电站的主要设备按船上使用情况联接成系统,进行调整和试验,验证设计的准确性和合理性,检查加工、制造和装配的准确性和符合性,使船舶电站能够按合同(或技术规格书)的规定协调正常,稳定可靠的工作;在客观试验条件允许的情况下,应尽可能地对电站的规定功能进行全面考核,试验应着重于船舶电站各设备间的配合和参数协调。同时,船舶电站成套试验还可提高电站设备系泊试验的成功率,保证电站系统在船舶航行试验时顺利达到设计规定的性能,以缩短系泊试验和航行试验的时间。

4.2 成套试验的试验文件

试验准备文件包括:

- (1) 电站系统的技术条件和试验大纲。
- (2) 主配电板产品质量合格证书及其随机文件。
- (3) 机组产品质量合格证书及其随机文件。
- (4) 电站控制装置(如设有)出厂试验合格证书及其随机文件。
- (5) 电站系统的原理总图、系统图和接线图。
- (6) 电站系统场地安装图。
- (7) 试验记录表格。

试验记录包括:

- (1) 试验项目。
- (2) 试验内容(方法)。
- (3) 试验要求。
- (4) 实测结果。
- (5) 测试设备或手段。
- (6) 试验环境。
- (7) 时间、人员等。
- (8) 试验说明。

4.3 技术参数调整

4.3.1 主配电板检查与调整

4.3.1.1 主配电板的外观检查

- (1) 检查外观质量。
- (2) 检查汇流排的连接质量。
- (3) 检查操纵手柄、按钮等运动件是否灵活可操。

4.3.1.2 测量主配电板绝缘

在整流器、半导体元件、电容器等器件断开(或短接)的情况下用500V绝缘电阻表测量主回路对地的绝缘电阻。应符合主配电板技术条件的规定。

4.3.1.3 检查发电机的主断路器

检查发电机的主断路器,能否在过载的情况下,自动分断主回路。

4.3.1.4 逆功整定

根据技术要求整定逆功继电器或逆功装置,整定逆功动作的数值和延时时间。

4.3.1.5 主配电板操作和显示功能检查

根据技术要求检查主配电板的操作与显示功能的正确性。

4.3.2 发电机组检查与调整

4.3.2.1 机组试验前的检查

- (1) 外观检查。
- (2) 紧固件安装质量检查。
- (3) 操纵手柄等运动件灵活性检查,并同时检查各有关操纵手柄(或断路器)是否在规定的位上。
- (4) 管系的安装质量检查。要消除漏油、漏水、漏气(汽)现象,并设法消除燃油管路中的空气。

(5) 电气线路接线质量检查。对采用电启动系统的柴油发电机组,尤其应注意检查蓄电池的“+”“-”极是否连接正确。

(6) 检查油位、水位是否在规定的范围内。

4.3.2.2 机组的绝缘电阻检查

检查主回路的绝缘电阻,应符合机组的技术条件的规定。

4.3.2.3 机组空载电压的可调范围检查

机组空载处于额定转速,调整电位器、观察发电机的电压变化范围是否符合机组技术条件的规定。

4.3.2.4 检查机组的稳态调压率

在 $\cos\varphi=0.8$ (滞后)情况下,检查机组的稳态调压率是否符合机组技术条件的规定。并在50%额定负载[$\cos\varphi=0.8$ (滞后)]的情况下,整定发电机的输出电压为额定电压。

4.3.2.5 检查机组的稳态调速率

可在 $\cos\varphi=0.8$ (滞后)或 $\cos\varphi=1$ 情况下,检查它是否符合规定。

4.3.3 电站监控装置(如设有)的检查与调整

根据技术要求检查电站监控装置的操作与显示功能的正确性。

4.4 成套试验

4.4.1 机组的调压和调速特性试验

在保持 $\cos\varphi=0.8$ (滞后),机组的功率由空载到满载,再从100%负载到空载,单向缓慢变化,每一分支不少于5点,记录各点的电压、电流、频率、功率、功率因数的数值。

4.4.2 机组的并联运行试验

4.4.2.1 并联运行机组间功率分配差度检查

保持 $\cos\varphi=0.8$ (滞后),使并联机组带上20%的总功率,调节发电几机组的空载电压整定电位器和转速设定装置,使并联机组的有功与无功分配基本一致;然后使并联运行机组的电压、电流、频率、功率、功率因数的数值,求出并联运行机组的有功与无功分配差度。测点应不少于5点。

在 $\cos\varphi=0.9$ (滞后), $\cos\varphi=0.6$ (滞后)时重复上述试验。

4.4.2.2 稳定并联运行1h试验

在负载功率保持在90%总额定负载, $\cos\varphi=0.8$ (滞后)时运行1h。

4.4.2.3 并联运行稳定性试验

按电站技术规格书的有关规定选定冲击负荷,一般为直接起动异步电动机,观察电站运行的稳定性,并联机组受到起动异步电动机起动电流的冲击后,应仍能自行稳定。主开关不跳闸,认为并联是稳定的。

4.4.2.4 电站监测和控制装置性能试验

详见本篇第6章《船舶电站的监测与控制》中的相应条款。

第2章 船用发电机组

1 概述

1.1 用途

现代船舶设备是高度电气化的。船上所有的甲板机械；所有为主机服务的机械设备；所有的舱室辅机、通风冷藏、空调系统和生活设施；船舶的观通导航、船内通信、照明装置等，几乎船上所有的系统、机械设备都离不开电，可见船上供电的重要性。

从供电的发电机组、输配电的供电网络到各用电设备构成了一个统一整体，称为船舶电力系统，见图 3.2-1。在船舶正常运行时，主发电机组向各用电设备和应急设备供电，应急工作状态应急发电机组能自动起动，通过应急配电板向应急设备供电。当船舶处于停泊状态时，通常由停泊发电机组向停泊时尚需工作的电气设备供电。另外，也常常可通过岸电箱接通岸电，而不必使用停泊发电机组。

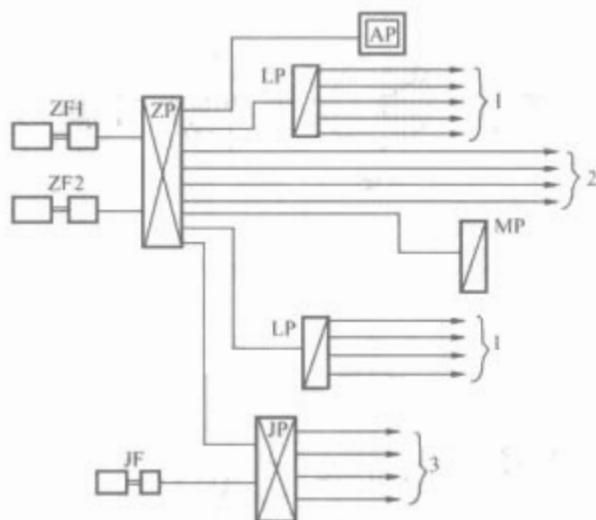


图 3.2-1 全船电力系统简图

ZF—主柴油发电机组；ZP—主配电板；JF—应急发电机组；
JP—应急配电板；LP—电力分配箱；MP—照明分配箱；
AP—舷外供电箱（岸电箱）；1—安装在附近，性质相似的用电设备；2—为推进装置服务的以及全船重要的用电设备；
3—应急用电设备

1.2 分类

1.1.1 按电制分类

船用电源有直流和交流两种，所以船用发电机组按电制分类有直流发电机组和交流发电机组两种。通常因交流电制具有较显著的优越性，所以国内外一些船舶如油船、客船、货船等都优先采用交流电制。仅在一些特殊船舶和小型内河船舶如渔船、小艇、工作船等采用直流电制。不少小型内河船舶上照顾到对蓄电池组直接充电，故电气设备仍以直流为主。

船舶电源设备的额定电压，国内采用的交流为 115V、230V 和 400V 三种，直流为 28V、115V 和 230V 三种。当今我国自行设计制造的大型船舶大多采用直流 230V 或交流三相 400V 和交流单相 230V 的电制。近年来，在一些大型

集装箱船、工程船和采用电力推进的船舶上出现了中压和高压的交流船舶电力系统。

1.1.2 按使用场合分类

船用发电机组按使用场合分类有电力推进发电机组、全船性发电机组和应急发电机组三类。电力推进发电机组即推进螺旋桨由电动机带动，主机不直接旋转螺旋桨而用来发电。推进发电机组功率主要按推进要求而定。全船性发电机组即供照明和辅机及其他电气设备用电，也称主发电机组。其功率一般从几十千瓦到数百千瓦，也有上兆瓦的。为满足各种工况下所有设备的电能需要，这种发电机组的全部设备都装在机舱内。应急发电机组必须能独立运转，按规定它应该安放在甲板以上的地方，其发电量必须保证全船重要设备用电（如操舵、电信设备、应急照明等）。应急发电机组的原动机常为高速柴油机，在某些小型内河船舶上，也可用蓄电池组作为应急电源。

1.1.3 按原动机种类分类

船用发电机组按原动机的种类分，主要有柴油发电机组和汽轮发电机组，在近代舰船上还有采用燃气轮机发电机组的，它们各自的特点如下：

柴油机工作效率高，随时可以起动，不需要锅炉和冷凝器等设备，工作独立性强。柴油发电机组不仅广泛用于柴油主机做动力的船上，而且也用在蒸汽动力装置的船上。无论哪一种船舶上，应急发电机组都用柴油机作为原动机。

汽轮机转速均匀，调速特性好，体积小，蒸汽利用率高，只是需配套锅炉和冷凝器等辅助设备，工作独立性较差。所以在用蒸汽动力装置的舰船上，除了安装汽轮发电机组外，为了快速备航和提高生命力，也安装柴油发电机组。

燃气轮机不需要锅炉设备，和柴油机一样，可以独立工作，它与前两类原动机相比，具有体积小、质量轻、起动快、不需要大量用水、运行维护简便、机动性大、造价和运行费用较低等一系列优点。但是由于燃气的高温，叶片材料用的合金钢昂贵，工作可靠性较差，寿命短。另外，由于燃气轮机工作时空气流量很大，造成进、排气管道尺寸较大，舱内布置比较困难。

2 柴油发电机组

2.1 基本原理

2.1.1 柴油机理想循环

柴油机属于内燃机，内燃机的工作循环是很复杂的，在分析研究这种循环时，一般先从经过假定和简化的理想循环开始，以确定和比较各种循环的理论热效率、明确提高热效率的途径并判断实际工作循环的完善程度等。所谓理想循环是基于如下假设：

(1) 工质为理想气体，其比热容不随温度变化而为一一定值。

(2) 循环由定量的工质进行，不考虑工质的更换与泄漏。

(3) 压缩与膨胀均为绝热过程。

(4) 以热源向工质加热代替燃料在气缸中的燃烧放热，以工质向冷源放热代替废气带走热量。

根据热源向工质加热过程的不同，理想循环可分为定容加热循环（汽油机、煤气机接近此循环）、定压加热循环以及混合加热循环（柴油机属于此循环）。各种循环的 $p-V$ 图及其理论热效率 η_i 分别示于图 3.2-2 与表 3.2-1。

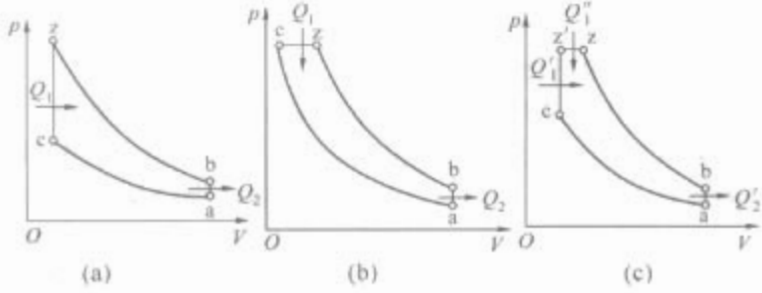


图 3.2-2 内燃机的理想循环
(a) 定容加热循环；(b) 定压加热循环；
(c) 混合加热循环

表 3.2-1 三种理想循环的理论热效率		
定容加热循环	定压加热循环	混合加热循环
$\eta_i = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$	$\eta_i = 1 - \frac{p^{\frac{1}{\kappa}} - 1}{\epsilon^{\kappa-1} \kappa (p - 1)}$	$\eta_i = 1 - \frac{\lambda p^{\frac{1}{\kappa}} - 1}{\epsilon^{\kappa-1} [\lambda - 1 + \kappa \lambda (p - 1)]}$

注 ϵ —压缩比， κ —绝热指数， ρ —前期膨胀比， λ —压力升高率。

当加热量与循环最高压力均相同时，定压加热循环的理论热效率最高，混合加热循环次之，定容加热循环最低；当加热量与压缩比均相同时，则定容加热循环的理论热效率最高，混合加热循环居中，定压加热循环最低。现代柴油机的循环最高压力和压缩比均高于汽油机，因而柴油机的热效率比汽油机高。

2.1.2 柴油机实际循环

柴油机实际循环中的工质燃烧前为空气或空气和燃料的混合气，燃烧后为燃烧产物，其比热容随温度上升而增大，因此当加热量相同时，实际循环中工质压力和温度的升高比理想循环要少。实际循环中还存在着其他各种损失，如传热损失、燃烧损失、时间损失和换气漏气损失等。这些因素均使实际循环的热效率降低。理想循环的热效率仅是实际循环所趋近而不可达到的极限。

柴油机实际循环的 $p-V$ 图可表明柴油机气缸内工质做功情况，称示功图（见图 3.2-3 和图 3.2-4），可用示功器测出。

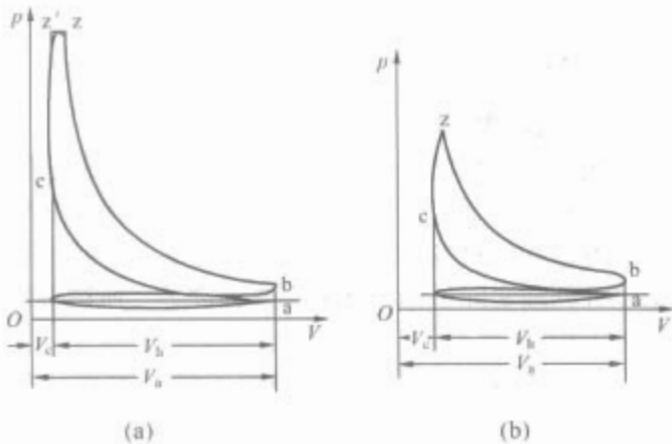


图 3.2-3 四冲程内燃机的实际循环
(a) 四冲程柴油机；(b) 四冲程汽油机

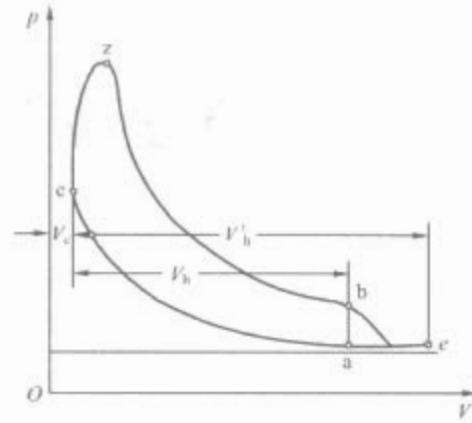


图 3.2-4 二冲程柴油机的实际循环

内燃机通过进气、压缩、燃烧——膨胀、排气四个过程完成一次工作循环（做一次功），期间四冲程内燃机曲轴旋转两周、二冲程内燃机则旋转一周（见图 3.2-5 和图 3.2-6）。

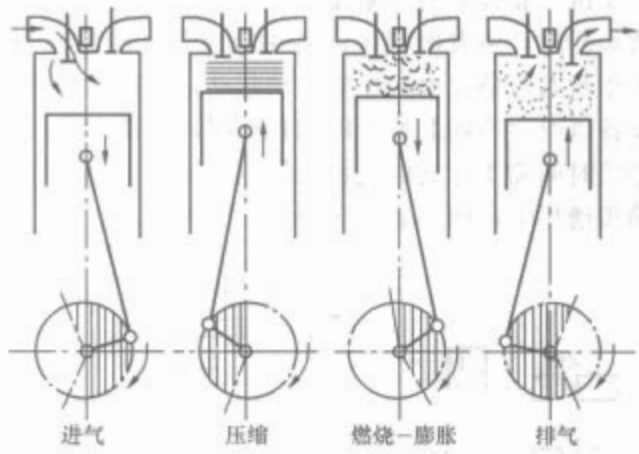


图 3.2-5 四冲程内燃机工作循环示意图

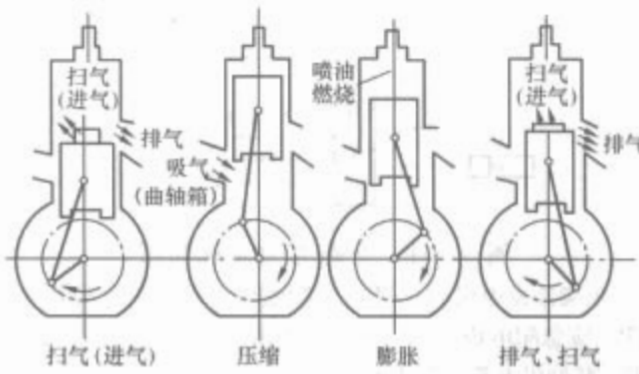


图 3.2-6 二冲程内燃机工作循环示意图

2.2 参数和指标

2.2.1 参数

柴油发电机组的主要参数包括额定功率、额定电压、额定电流、额定频率、额定功率因数、相数、额定转速、发电机工作制和绝缘等级、机组质量和外形尺寸等等。此外，还包括如下柴油机的主要参数：

(1) 有效功率 N_e 和转速 n 。 N_e 是柴油机实际输出的净功率 (kW)， n 是柴油机曲轴每分钟的转速 (r/min)

$$N_e = N_i - N_m \quad (3.2-1)$$

$$N_e = \frac{M_e n}{9550} \quad (3.2-2)$$

式中： N_i 为指示功率，kW； N_m 为机械损失功率，kW，包括摩擦损失、泵气损失和驱动附件损失的功率等； M_e 为柴

油机输出扭矩, $N \cdot m$ 。

(2) 平均有效压力 p_e 。 p_e 是柴油机每工作循环中单位气缸工作容积所发出的有效功 (MPa)。 p_e 是表征柴油机强化强度的重要指标

$$p_e = \frac{0.03\tau N_e}{V_h i n} \quad (3.2-3)$$

$$N_e = \frac{V_h p_e i n}{30\tau} \times 10^3 \quad (3.2-4)$$

$$M_e = \frac{318 V_h p_e i}{\tau} \times 10^3 \quad (3.2-5)$$

式中: V_h 为气缸工作容积, m^3 ; i 为气缸数; τ 为冲程数, 四冲程 $\tau=4$, 二冲程 $\tau=2$ 。

对每台柴油机, 其 p_e 与其 M_e 成正比, M_e 代表了单位气缸工作容积输出扭矩的大小。

(3) 升功率 N_l 。 N_l 是每升气缸工作容积所发出的有效功率 (kW/l)。 N_l 大, 则柴油机紧凑、强化程度高

$$N_l = \frac{N_e}{i V_h} = \frac{p_e n}{30\tau} \quad (3.2-6)$$

(4) 活塞平均速度 C_m 。 C_m 是在曲轴每一转的两个行程中活塞的平均速度值 (m/s)

$$C_m = \frac{Sn}{30} \quad (3.2-7)$$

式中: S 为活塞行程, m 。

(5) 机械效率 η_m

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_l} = \frac{N_e}{N_e + N_m} \quad (3.2-8)$$

柴油机的 η_m 的范围: $0.70 \sim 0.85$ 。

(6) 燃油消耗量 G_T 和燃油消耗率 g_e 。 G_T 是柴油机每小时消耗的燃油量 (kg/h)。 g_e 是每千瓦每小时消耗的燃油量, $g/(kW \cdot h)$

$$G_T = \frac{m \times 3.6}{t} \quad (3.2-9)$$

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} \times 10^3 = \frac{m \times 3600}{t N_e} \quad (3.2-10)$$

式中: m 为在测定时间 t 内, 柴油机消耗的燃油量, g ; t 为消耗 m 燃油量所需的时间, s 。

(7) 比质量 g_N 。 g_N 是柴油机的净质量与其标定功率的比值 (kg/kW)。 g_N 说明金属材料在柴油机中的利用程度, 它与柴油机用途、寿命、材料性能和工艺水平等因素有关

$$g_N = \frac{G}{N_e} \quad (3.2-11)$$

式中: G 为柴油机净重, kg 。

2.2.2 主要性能指标

柴油发电机组的技术性能指标, 是衡量机组供电质量和经济指标的主要依据。其主要技术性能通常指机组的功率因数从 $0.8 \sim 1.0$ 、三相对称负载在 $0 \sim 100\%$ 或 $100\% \sim 0$ 额定值的范围内渐变或突变时, 应达到的性能。

(1) 稳态电压调整率 δ_u

$$\delta_u = \frac{U_1 - U}{U} \times 100\% \quad (3.2-12)$$

式中: U_1 为负载变化后的稳定电压的最大值 (或最小值), V ; U 为空载整定电压值, V 。

(2) 稳态频率调整率 δ_f

$$\delta_f = \frac{f_1 - f_2}{f} \times 100\% \quad (3.2-13)$$

式中: f_1 为负载渐变后的稳态频率的最大值 (或最小值), Hz ; f_2 为额定负载时的频率, Hz ; f 为额定频率, Hz 。

(3) 电压稳定时间。从负载突变时算起到电压开始稳定所需的时间, 通常是用示波器来测量。

(4) 频率稳定时间。从负载突变时算起到频率开始稳定所需的时间, 通常也是用示波器来测量。

(5) 空载电压整定范围。机组整定电压应能在额定值的 $95\% \sim 105\%$ 范围内调节和稳定工作。例如额定电压为 $400V$ 的机组, 其空载电压可在 $380 \sim 420V$ 之间调整。

(6) 在三相不对称负载下运行电压的稳定度。机组供电在三相不对称负载下运行时, 如果每相电流都不超过额定值, 而且各相电流之差不超过额定值的 25% , 则各线电压与三相电压平均值之差应不超过三相线电压平均值的 5% 。

(7) 机组的并联性能。两台规格型号完全相同的三相机组, 在额定功率因数下, 应能在 $20\% \sim 100\%$ 额定功率范围内稳定并联运行。为了提高有功功率和无功功率, 合理分配精度和运行的稳定性, 要求机组中柴油机调速器具有在稳态调速率 $2\% \sim 5\%$ 范围内调节的装置。在控制箱 (屏) 内的调压装置可使稳态电压调整率在 5% 范围内调整。

此外, 还有电压、频率波动率、超载运行时限、瞬态电压、频率调整率及直接启动空载异步电动机等性能。随着技术的发展, 国产和引进的各类机组还具有其他特殊的性能, 这里不多介绍。

2.3 原动机的选型

2.3.1 功率的选择原则

柴油机的功率选择与整艘舰船上的电站配置有关, 电站通常由数台发电机组所组成, 每台机组的功率有取相同的, 也有取不同的。在考虑每台机组的功率时, 必须满足两项基本要求:

(1) 运转机组 (一台或多台并联) 的总输出, 应能满足当时船舶状态的最高电负荷, 并且有适当的裕量。

(2) 运转机组 (一台或多台并联) 的一台机组因故失去供电能力时, 应有后备机组代替, 并能保持原来的总输出功率。

此外在具体选择时一般还要考虑:

(1) 每台机组在长期运行工况的负载, 应该不少于电站总容量的 70% , 一般为 80% 左右。

(2) 在停泊状态时, 停泊发电机组的最低负荷应不低于 50% 。

(3) 必须尽可能采用同容量同型号机组, 若容量有差别, 也尽可能选用同机型系列、不同气缸数的柴油机来解决, 这样有利于并联运行的稳定性及减少备品、减少维修保养量, 并增加机组之间的互换性。

(4) 对于民用船舶, 要求机组台数要少些, 使维修简单、管理方便。一般是用二至三台机组组成电站, 万吨级远洋货船, 电站常用三台机组组成。在舱室空间容许的条件下, 民用船舶往往选择大功率的中低速船用柴油机, 并燃用重油, 以取得更好的经济性。

(5) 对于舰艇, 为了提高其生命力, 应增加机组台数和电站数。大型舰艇为三至四个电站, 中小型舰艇 (如护卫

舰、驱逐舰)的电站不少于两个,小艇可只装一个电站。当一艘舰艇上有两个电站时,每一电站要安装两台机组,在战斗时,实施分区供电以提高供电的生命力。目前,国内外舰船柴油机以大功率高速柴油机为主,部分选用大功率中速柴油机。

2.3.2 转速的选择原则

柴油机的转速对发电机组的性能关系很大,一般认为中速机(500~750r/min左右)比较好,因为相比低速柴油机,中速机质量较轻,占机舱空间也小;而同高速柴油机相比,它工作比较可靠耐用,大修期长,而且耗油率也较低。对于机舱舱容小且机械设备多的船,发电机组的外形尺寸和质量便成为突出问题,因而采用高速柴油机的也很多。

对应持续功率的转速是柴油机的额定转速 n_N ,发电用柴油机的额定转速选择受到较大的限制,它与机组额定频率 f_N 、发电机的极对数 p 有关,即 $n_N=60f_N/p$,举例来说,50Hz用电频率、发电机的极对数为2的话,柴油机的额定转速应在1500r/min;60Hz用电频率、发电机的极对数为2的话,柴油机的额定转速应在1800r/min。个别情况下,若转速不能满足要求,可在柴油机的功率输出端配置增速或减速齿轮箱,将柴油机的输出转速转换到所需额定转速后与发电机成套,由于多了一个环节,机组的可靠性有所降低。

2.3.3 其他

在柴油机选型时还应考虑它的调速性能指标、并联运行指标和抗冲击性能指标等满足技术规格书的要求。

2.4 功率匹配性设计

柴油机与发电机功率匹配性设计时,应考虑使用舰船环境因素的影响。

选择柴油机在标定工况时的持续功率来进行功率匹配性计算,标定工况为特定的空气温度、大气压力、增压空气冷却水进口温度、排气背压、空气相对湿度等,对于不同型号的柴油机,标定工况不一定相同,然后按照柴油机的功率修正曲线或给定的方法(一般由制造厂给出),将柴油机的输出功率修正到该机在要求的使用环境下输出的功率值 P_{HY}

$$P_{HY} \geq \frac{P_{HF}}{\eta_g} \quad (3.2-14)$$

式中: P_{HY} 为柴油机经环境修正后的输出功率,kW; P_{HF} 为机组额定功率,kW; η_g 为发电机效率,%,当然如果柴油机和发电机之间经过齿轮箱增、减速的话,除考虑发电机效率外还应考虑齿轮箱的机械效率。

2.5 结构设计

柴油机和发电机的轴系通过弹性联轴节弹性联结,它们的机体则通过公共底座刚性联结成一体。

2.5.1 机组轴系的设计

(1)柴油机和发电机的轴中心的对准应具有足够的同心度和平行度,保证机组的当量振动烈度符合相关的国家标准和国军标。

(2)对于采用双层隔振的机组,为保证机组的中心高度和质量在一定的范围内,柴油机和发电机可采用过渡接口和特殊构架的方式,以保证机组轴中心的对准。

(3)柴油机和发电机之间弹性联轴节的选择,应根据整个轴系的转动惯量,保证机组的扭转振动在允许的范围内。

在任何情况下,机组轴系的扭转振动应不影响发电机的正常工作。

(4)机组轴系的扭振许用应力应符合相关的国家标准和国军标的规定。机组成套设计时,必须经过扭振计算,并经实测校核。

(5)施加在发电机转子上的振动惯性扭矩,当转速在95%~110%额定转速的范围内时,应不超过 $\pm 2M_e$ (M_e 为额定转速的平均扭矩),当转速低于95%额定转速时,应不超过 $\pm 6M_e$ 。

(6)在额定工况下,发电机转子上的合成振幅应不大于 $\pm 2.5^\circ$ (电角度)。

(7)若机组采用弹性联轴节时,联轴节的弹性元件在持续运行时的振动扭矩应不超过其许用交变扭矩值,在瞬时运行时应不超过其瞬时运转的许用交变扭矩值。

(8)机组转速在95%~115%额定转速的范围内时,一般不应产生 $Z/2$ 和 Z (柴油机气缸数)次简谐振动的临界转速和共振区,且转速在90%~105%额定转速范围内时,不宜采用减小振动的方法来消除共振。

(9)当柴油机的转速高于3000r/min时,应设计或选用相应的减速机构连接柴油机和发电机。

(10)机组的临界转速应远离其工作转速范围,机组轴系的设计应使其任意临界转速与机组额定转速的转速差大于额定转速的20%,当机组运转通过其额定转速以下的临界转速时,应有足够的阻尼。

2.5.2 公共底座的设计

(1)舰船用发电机组一般均设公共底座。

(2)底座应由钢板制成。

(3)设计时应考虑到底座的刚度和强度能承受下列载荷:设备的质量(包括工作时液体的质量),以及所连接的管路和电缆的无支撑长度一半的质量,再加上舰船运动和振动的动力效应;由于设备本身的运转以及由连接系统产生的负荷。

(4)底座结构应比例相称,以便获得合理而均匀的应力分布,从而通过弹性变形最大限度地吸收能量。凹角和应力集中的其他起因均应尽力避免。

(5)焊接底座必须经过处理,消除内应力。

(6)在垂直冲击力作用下,应尽量使螺栓处于拉应力作用下而不处于切应力状态。螺栓孔的公差应符合有关规定。

(7)底座的设计应确保在任何工作条件下,不因热膨胀而引起机组的不对中或过量变形。底座的刚度应足以防止设备运行的不对中、过量的振动和摇动。

2.6 成套性设计

机组轴系和公共底座的设计要求分别见第2.5.1条和第2.5.2条。

柴油机和发电机经公共底座联结成一体后,尚需配备燃油、滑油、冷却水、压缩空气和排气等辅助管系,方能可靠地正常工作。本节我们主要介绍柴油发电机组这一范围内的管系设计,而不介绍全船的动力管系设计。

本节介绍的机组辅助管系的基本组成和原理,是以MTU16V396TE54型柴油机为原动机的柴油发电机组的辅助管系。

2.6.1 燃油管系

燃油管系的基本任务是保证柴油机所需要的燃油。

(1)燃油的选用。柴油机一般使用的燃油有轻柴油、重

柴油和重油等。轻柴油适用于高速柴油机；重柴油适用于中、低速柴油机；重油适用于大型低速柴油机。

轻柴油按其凝点可分为10、0、-10、-20、-35五种牌号。10号轻柴油适用于夏季使用；0号轻柴油适用于4~9月使用；-10号轻柴油适用于冬季使用；-20号轻柴油适用于严冬使用；-35号轻柴油适用于高寒地区严冬使用。

重柴油按凝点分为10、20、30三个牌号。10号重柴油适用于500~1000r/min的中速柴油机；20号重柴油适用于300~700r/min的中速柴油机；30号重柴油适用于300r/min以下的低速柴油机。

重油按80℃时的运动黏度分为20、60、100、200四个牌号，重油适用于大型柴油机。

(2) 燃油耗油量。柴油机的耗油量 G (kg/h) 计算如下

$$G = \frac{N_G q_e}{\eta_G \eta_m} \times 10^{-3} \quad (3.2-15)$$

式中： N_G 为发电机负荷，kW； η_G 为发电机效率，%，应根据制造厂提供的数值计算，在未取得上述资料时，可参考下列数值：当功率为48~200kW时， $\eta_G = 89.5\% \sim 92.0\%$ ；当功率为300~1000kW时， $\eta_G = 92.0\% \sim 95.0\%$ ； η_m 为传动效率，%，靠背轮直接传动 $\eta_m = 100\%$ ； q_e 为柴油机的燃油消耗率，g/(kW·h)。

(3) 日用油箱。柴油机的日用油箱有的随机供应，有的需自行设计，其容量一般可按每班上一次油来考虑。为满足防火要求机房内燃油总贮油量不宜超过5t。

日用油箱容积 V (m³) 按下式计算

$$V = G \frac{1}{\gamma} \frac{1}{A \tau} \quad (3.2-16)$$

式中： G 为柴油机燃油消耗量，kg/h； γ 为燃油密度，kg/m³； A 为容积系数（一般可取 $A=0.9$ ）； τ 为供油时间，h，一般可取 $\tau=9 \sim 10$ 。

日用油箱一般采取地上高位布置自流供油方式。当燃用黏度较大的燃油时，为提高流动性，油箱内可选用圆柱型或平板型加热管，但箱内加热温度不宜超过85℃。

(4) 基本组成和原理。该机组燃油管系由燃油输送泵、手撒泵、燃油双联滤器、高压燃油管、喷油泵、喷油器、泄漏油箱等组成。

柴油机自带的燃油输送泵从日用油箱中吸出燃油，并且将燃油经过止回阀和燃油双联滤器送到喷油泵。根据所要求的柴油机功率（调速器调节），喷油泵将一定量的燃油通过高压油管和喷油器喷入气缸。喷油泵内的溢流油路使多余的燃油返回日用油箱。在回油管路中装有止回阀，它用来保证喷油泵工作顺利所需的供油压力。

为安全起见，柴油机上的高压油管多设计为夹层套管。万一漏油时，泄漏燃油可经由高压油管内、外管之间的空隙被送至泄漏油箱。漏油指示装置安装在泄漏油箱内，在达到预先设置的报警液位时即向机旁监控箱发出报警信号。

柴油机停机时燃油管路的注油和放气是靠燃油手撒泵来实现，它将燃油从燃油输送泵前的吸入管中吸出，不经输油泵直接送到燃油输送泵后的高压油管中。

2.6.2 滑油管系

滑油管系的任务是保证供给柴油发电机组中各运动件摩擦表面适量的润滑油，以形成油膜，避免各种机件间产生干摩擦。且润滑油除了减少摩擦阻力和摩擦外，还起着冷却、洗涤、气密、防锈和减振等作用。

柴油机的滑油管系由机内和机外两部分组成。机内的滑油管系随柴油机一起出厂供应。一般小型柴油机采用飞溅式滑油系统，它的润滑油是靠曲轴连杆旋转时把油底壳的滑油飞溅至润滑部位。这是一种最简单的润滑方法。机外的滑油系统多为压力式滑油管系，它是靠滑油泵或重力油柜将滑油以一定的压力强行压入各摩擦部位。现在绝大多数柴油机均采用这种润滑方法。

发电机的轴承有两种，滚动轴承和滑动轴承，大型电机一般选用滑动轴承。滚动轴承的润滑很简单，即按照发电机润滑铭牌的要求添加润滑脂。滑动轴承分自润滑和强迫润滑两种，其中强迫润滑较复杂，由油箱、滤器、循环泵、冷却器、加热器、电气控制箱等设备组成，自成一整套独立的滑油管系，以保证供给发电机的滑油具备合适的压力、流量和温度。

(1) 润滑油的选用。为保证柴油机可靠地润滑，对润滑油的质量一般都有严格的要求，应按制造厂的要求，根据不同的船用条件，选择合适的润滑油。

常用的柴油机润滑油有下面几种：

柴油机润滑油分8、11、14号三个牌号，适用于高速柴油机。

低速柴油机润滑油适用于中、低速柴油机。

汽油机润滑油分6、10、15号三个牌号，适用于中、低速柴油机。

汽轮机油，适用于高速转动的增压器。

(2) 基本组成和原理。柴油发电机组滑油系统一般采用带闭式阀座润滑系统的湿式油底壳压力循环系统。滑油泵通过吸油罩斗从油底壳中抽出滑油，并通过连接管将滑油送至柴油机右侧的两个滑油冷却器，一部分滑油在进入冷却器前分流到旁通滤器。滑油从冷却器中流出，通过压力调节阀流入滑油滤器，从滤器中流出的滑油则流入柴油机的主油道。从主油道中流出的滑油流向曲轴、自由端的轴承、凸轮轴、活塞冷却系统、喷油泵传动装置端盖上的管路接头和滑油分配箱。剩余的柴油机滑油将通过油孔和油管流向柴油机油底壳中。

2.6.3 冷却水管系

柴油机和发电机在正常运转过程中不断地发出热量，这些热量必须及时散发，否则发热件的温度将连续上升以致超过允许界限而不能再工作下去。冷却水管系的主要使命就是解决散热问题，提高设备的工作可靠性。

冷却水有两种，一种是舷外水，不论是河水、湖水或海水，我们通称为海水；另一种是淡水。舷外水中所含泥沙、污物较多，易使过滤器、冷却器堵塞。特别是海水中的盐分，对机件的腐蚀很严重，而所沉积的污垢会降低热传导效率，从而影响柴油机的运转。

(1) 淡水水质的要求。淡水水质对柴油机的运行和使用寿命有很大影响。淡水水质不良，将引起气缸水套沉积水垢和污秽物，恶化气缸壁的导热性能，降低冷却效果，使柴油机受热不均，气缸壁温升高，以致破裂。

对淡水水质的要求，一般规定如下：

1) 没有游离的矿物质及有机酸（pH值应在6.5~9.5之间）。

2) 有机物含量不大于25mg/L。

3) 悬浮物含量不大于25mg/L。

4) 暂时硬度不大于10°（德国度）。

5) 含油量不大于5mg/L。

(2) 基本组成和原理。为避免海水对柴油机的不良影

响,目前大多数柴油机上均设计有两套独立的冷却水管系——海水管系和淡水管系,柴油机内部由淡水来冷却,淡水由海水间接冷却,这种管系设计还有利于提高热效率,缩短暖机时间,提高机动性。

发电机有两种冷却方式,一种是开路冷却,即采用轴带风扇内部冷却,电机内部的热空气与舱室空气进行热交换;另一种是闭路冷却,发电机安装有空气/水冷却器,电机运转产生的热量由冷却水带走,可大大改善舱室环境。当冷却器发生泄漏而又需应急运行时,可通过简单地操作,很方便地将发电机从闭路冷却转换为开路冷却。发电机的冷却水一般为低温的海水。

该机组的冷却水系统由两个独立的循环系统组成,即淡水循环系统和海水循环系统。

1) 淡水循环系统。柴油机运行时靠机带的淡水泵提供淡水。淡水泵在柴油机自由端右内侧,并且由曲轴经齿轮传动。淡水泵将淡水压入柴油机,从柴油机排出的淡水流过节流孔板,将淡水流分为“高温循环”和“低温循环”两个回路。其中约 2/3 淡水通过高温循环直接回到柴油机的进水侧。淡水是由下至上地围绕着气缸套并通过进水套管进入气缸盖的冷却水腔,淡水在气缸盖上冷却缸盖底部、气阀导承、喷油器和排气管道。其余 1/3 淡水则导入由一个温度调节器控制的低温循环回路。在空载及低负荷时,温度调节器控制柴油机来的高温淡水绕过海水——淡水冷却器经旁通管路直接进入增压空气冷却器、滑油冷却器,并与高温循环回路水流汇合一起送至淡水泵。当柴油机达到了正常运行工作温度时,淡水温度调节器则控制柴油机来的高温淡水,此时旁通口逐渐关闭,而相应的使淡水流经海水——淡水冷却器直接进入增压空气冷却器、滑油冷却器,并与高温循环回路水流汇合一起送至淡水泵。为了避免淡水泵的入口出现真空使泵叶轮出现穴蚀,在吸入管内装有一个扩压器(混合管)和一个喷射器。它们在与流来的淡水接触时可以升高淡水循环系统的压力。通过淡水膨胀水箱来的淡水补偿管路将淡水供给喷射器。放水阀安装在淡水循环系统的最低位置。淡水膨胀水箱安装在淡水冷却器上。膨胀水箱的呼吸阀在超压和真空状态时打开。

2) 海水循环系统。柴油机机带的海水泵为自吸式机带离心泵。海水泵入口布置在泵壳体的上部,使泵在柴油机停机时仍充满水并在每一次启动时能立刻吸上水。海水泵通过一只排水螺塞排水。

海水用来冷却柴油机淡水以及发电机内的空气。布置在自由端的海水泵从舷外海水箱经滤器吸入海水并通过多头接口管路将海水分别送至淡水冷却器、发电机冷却器。在分路的每一进水管路中装有一块孔板用来调节柴油机冷却器、发电机冷却器的水流量。

2.6.4 压缩空气管系

柴油机的起动方式一般有手摇起动、电动机起动、汽油机起动和压缩空气起动四种。由于手摇起动仅能适用于小容量柴油机,电动机起动消耗电力过大,而汽油机起动又比较复杂,所以在大中型柴油机上均采用压缩空气起动,它具有起动迅速、可靠的特点。

柴油发电机组的压缩空气起动系统主要由空压机、空气瓶、起动阀、三通电磁阀、空气分配器、连接管路及软管组成。其中空压机和空气瓶由船厂总体考虑设置,空压机的工作压力应满足柴油机最大起动压力的要求,空气瓶容量至少应保证柴油机连续起动 6 次的用气量。

柴油机用压缩空气通过气缸起动,装在自由端的起动空

气分配器由右列气缸的凸轮轴驱动,它控制着准备好的压缩空气,并按发火顺序将它送至各起动阀。起动阀和减压阀装在气缸盖上。

2.6.5 排气管系

柴油发电机组的排气管设计应力求减少弯头,并尽量使转弯平缓,减少管道阻力,避免排气背压过大。排气管道上通常装有波形伸缩节以补偿管道的热伸长,同时还有隔振作用。每台柴油机一般应有自己单独的排气管和消声器,不应互相连接。在特殊情况下需要将排气管连接起来时,每台柴油机的排气管应装隔板或止回阀,防止废气倒灌到不工作的柴油机中去。

柴油发电机组的排气管一般采用水平架空敷设。

2.7 隐身性设计

柴油发电机组是舰船中一个宽频带、高强度的振动与噪声激励源,其通过基座和管路传递到船体机座的中、高频振动(即结构噪声),将引起水下辐射噪声,影响舰船的隐蔽性。其辐射的空气噪声,将引起船员烦躁、疲劳及误操作,影响舰船的正常使用功能。为了减少空气和结构噪声,发电机组应尽可能安装隔声罩和采取隔振措施。

2.7.1 隔振系统的设计要求

由于隔振装置的采用,柴油机传递给机座的扰动力便大大衰减,只传递一部分或极少一部分,从而减小结构噪声。另外,根据实船实例说明,动力机械采取隔振处理,对于本舱室的噪声虽然减弱不多,但由于振动被隔离或衰减,使邻室噪声却有较大降低。

对发电机组来说,一般采用整体式隔振,把柴油机和发电机安装在公共底座上,然后在公共底座与船体机座之间设置减振器,这就是单层隔振,它的隔振效果(平均加速度总振级落差)一般在 20dB(A) 以上;双层隔振是把安装有柴油机和发电机的公共底座通过上层减振器安装在浮筏上,浮筏再通过下层减振器安装到船体机座上,它的隔振效果一般在 35dB(A) 以上。对于双层隔振,可采用每个机组单独安装浮筏,也可采用舱室浮筏,统一考虑同一个舱室内的几台机组的隔振设计。

(1) 浮筏的设计。浮筏有完全钢结构的,也有在钢结构中充填高强度聚合物混凝土的。柴油发电机组的高频扰动成分丰富,采用在浮筏中充填高强度聚合物混凝土的方法并且上、下层减振器支承之间无钢结构刚性连接,这样可利用钢结构与聚合物混凝土之间的阻抗不匹配及聚合物混凝土的高阻尼性能,隔离机组的高频振动,以提高双层隔振装置高频振动的隔离能力。

浮筏的结构设计主要考虑强度、刚性和质量比,其弯曲及扭转主模态频率应大于干扰基频的 2 倍,在上、下层减振器的各支承点处要有较高机械阻抗。浮筏的焊接件应进行消除内应力的处理,如退火处理,以消除内应力。

(2) 减振器的选型。减振器的型式基本上可分橡胶减振器和金属弹簧减振器两大类。前者由于结构简单,制造容易,成本低廉,已在舰船上获得广泛应用。它的另一优点是具有一定的内阻尼,在通过共振区域时有良好的抑振作用。其缺点是对声下振动的隔离能力较弱,对油质的侵蚀较为敏感,以致引起橡胶老化和缩短使用寿命。金属弹簧减振器的弹性稳定,对温度变化和油质侵蚀不敏感,可以承受较大荷重,对减弱低频的声下振动效果好。缺点是对中高频率的振动隔绝性能较差,以及内部阻尼过小。因此,为了改善隔振效果,常将弹簧减振器放置在柔软的衬

垫材料上。

(3) 隔振系统的设计。为了取得较好的隔振效果,必须使柴油机隔振系统的固有频率 f_0 比柴油机干扰力频率 f 小得很多,在实际隔振设计中常选用 $f/f_0=2.5\sim 5$ 之间。柴油机的干扰力频率是随柴油机转速而定的,其基频为 $f=n/a$ (其中 n 为柴油机转速; a 为冲程系数,四冲程 $a=2$,二冲程 $a=1$)。机组的固有频率主要随选用的减振器刚度 K 、机组质量 M 和布置位置而变化。对最简单的单质量系统,忽略阻尼时,机组的固有频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3.2-17)$$

在实际隔振系统中,机组被若干减振器支承,由于减振器布置不同和各个方向上刚度不同,因而隔振系统6个自由度的固有频率一般不是独立的,而是有耦合作用,所以实际系统的固有频率要比公式复杂得多。为消除耦合现象,要求被隔振机组的重心和隔振系统总的弹性力合力中心尽可能相重合,机组的主惯性轴和弹性主轴尽可能相重合。

设计中一定要保证被隔振机组在全弹性隔离后能自由晃动,因此,它与外界相联系的管路(油、水、排气管)、电缆等联接件一定要具有挠性,如采用夹布胶皮管、蛇形软管、橡胶弹性接管、金属波纹管等等,以组成全弹性隔离装置。

隔振系统应进行整体冲击响应计算和稳定性校验,其中冲击响应分析是计算机组及其关键部位在冲击状态下的极限加速度响应,以保证设备在冲击时的安全性;稳定性校核是考察整套装置在冲击和高海情工况下的各点位移是否满足稳定性要求,确定挠性接管和减振器的变形是否在其允许范围内。

2.7.2 隔声罩的设计要求

把柴油发电机组这一噪声源布置在隔声罩内,与操作者隔开,可降低噪声源的直接辐射噪声,改善舱室环境。隔声罩由框架、隔声门、隔声板、压板、门锁、铰链、观察窗口等构件组成。

(1) 框架的设计。框架由矩形钢管联接而成。由于矩形钢管具有惯性大、抗弯强度高的特点,即使为满足总体对质量的要求而限定矩形钢管的厚度时,仍能保证框架有足够的刚度。为满足机组维修的要求,隔声罩的框架必须是拆卸式结构,因此矩形钢管间采用螺栓连接。

(2) 隔声门、板的设计。隔声罩顶部及四周用隔声门或隔声板隔离和吸收机组空气噪声,隔声板可以方便地拆卸。隔声门为带铰链的对开门式结构,进柴油机自由端的隔声门上可设有观察窗,供观察机组运行用,观察窗处的隔声量应与隔声门、板相同。

隔声门、板由复合钢板、阻尼材料、吸声材料及穿孔板等组成。通过复合钢板、阻尼材料、吸声材料三者的组合,确保隔声门、板具有良好吸、隔声效果以及刚度和强度,不致产生“吻合效应”和“二次辐射”。门、板周边与框架贴合处,安装有密封条,通过压板和门锁将其与框架紧密贴合,防止箱体漏声。

隔声门上的手柄、风钩等活动构件均有固紧装置,防止在冲击、振动的作用下振动产生二次噪声。

单扇隔声门的质量一般情况下不大于40kg,以单人能搬动为宜。隔声板上安装有拉手供搬动。

隔声门、板的布置要便于机组检测、维修和易损件更换,以及大修时的设备吊装。

(3) 隔声罩与浮筏的连接。隔声罩底部与浮筏的结合面设置减振垫,在保证密封缝隙防止漏声的同时,隔离浮筏结构噪声向隔声罩的传递。隔声罩与浮筏之间用螺栓进行垂向拉伸限位,安装限位器在水平方向进行限位,在冲击时允许隔声罩与浮筏之间有相对位移,同时为防止加速度突然增加在接触部位采用了抗冲垫。这些措施使得隔声罩满足在冲击和高海情情况下正常工作的要求。

(4) 隔声罩的密封。隔声罩顶部设有柴油机进、排气口及隔声罩通风口,各接口处均接有挠性接管以补偿船舶在冲击、倾摇工况下设备的位移。在所有的孔、洞、缝的位置如管路、电气接线的通舱处均采用密封处理,防止隔声罩漏声。

发电机主电缆出线盒穿越隔声罩与外部电缆相接,出线盒与隔声罩之间有隔声及吸声材料填充,保证密封的同时允许在高海情及冲击时出线盒与隔声罩间相对位移。

(5) 其他。

1) 隔声罩内应保持一定的真空度。

2) 隔声罩内应设有冷却散热系统(即罩内空气冷却器)、火灾报警、灭火系统和照明灯具。灭火系统应可以遥控和机旁手控。

3) 对自带海水泵的柴油发电机组,加装隔声罩要进行热平衡计算,确定隔声罩内空气冷却所需的冷却海水流量以及罩内空气冷却器的冷却效率。

4) 罩内空气冷却器应保证罩内空气温度一般不高于65℃。系统应考虑油污滤清、消音措施和速关阀门,机组停机后罩内空气冷却器的风机应保证运行足够的时间再停机。

5) 隔声罩应具有可靠的起吊措施以便隔声罩整体吊装。

6) 隔声罩与机组的任何部分不应有刚性连接。隔声罩与发电机组基座均应固定在具有隔振功能的浮筏上。

2.8 稳定性设计

2.8.1 参与并联运行的柴油发电机组的调速性能要求

(1) 参与并联运行的柴油发电机组的调速器应具有能改变调速率的可调机构,其可调范围一般的下限值应为0,其上限值应不小于5%,机械调速器至少应有2%额定转速的可调范围,以使机组并联运行时将各机组的调速率调到基本一致。

(2) 机组调速器应设有遥控转速的伺服机构,其调节转速的灵敏度应在每秒0.5%~1.5%额定转速范围内,以适应遥控、自控调节转速的需要。伺服机构还应设有机旁手控、遥控转速的离合器和调速手柄到达极限位置的保护装置。

(3) 机组调速性能应符合表3.2-2的规定,调速精度可根据舰船实际使用要求确定。

(4) 机组应设有超速保护装置或措施,以防止柴油机转速超过115%额定转速。

(5) 为保证并联运行的稳定性,对参与并联运行的机组的稳态调速率应 $\geq 2\%$,在舰船上,机组的稳态调速率一般设定在 $\leq 3\%$,参与并联运行的各机组的调速特性应基本一致。对蒸汽参数滑变的汽轮发电机组的稳态调速率一般设定在 $\leq 4.5\%$ 。参与并联运行的各发电机组之间稳态调速率的偏差应 $\leq 0.2\%$ 。

2.8.2 参与并联运行的发电机组的励磁调压系统及其调压性能要求

(1) 励磁调压系统。

表 3.2-2 机组调速性能

项 目	精 度 等 级		
	I 级	II 级	III 级
稳态调速率 δ_{st} (%)	≤ 2	≤ 3	≤ 5
瞬态调速率 δ_d (%)	≤ 5	≤ 7	≤ 10
恢复时间 t (s)	≤ 2	≤ 3	≤ 5
转速波动率 ν (%)	≤ 0.4	≤ 0.4	≤ 0.5
不灵敏度 ε (%)	≤ 0.25	≤ 0.35	≤ 0.5
非线性度 γ	$\leq 0.15\delta_{st}$	$\leq 0.15\delta_{st}$	$\leq 0.2\delta_{st}$
			$\leq 0.3\delta_{st}$ (机械调速器)

注 应急机组和非增压或低增压柴油机均应进行一次突加、突加 100% 额定负载试验。对于高增压机组, 允许分段突加 50% 额定负载、突卸 100% 额定负载或按产品规范规定执行。

1) 发电机组一般应优先选用具有相同线路的励磁调节系统的发电机, 励磁调压系统应具有稳态调压率 δ_u 的调差装置 (下降特性), 其调节范围应不小于 5%。

2) 主配电板上应设有微调发电机空载电压的遥控电压整定电位器, 机组的励磁调压系统在空载时应能手动平滑调节整定电压, 其调节范围为 95%~105% 空载电压。

3) 带自动电压调节器的相复励和无刷相复励励磁发电机应具有限制过电压的措施, 其整定值应在额定电压的 105%~120% 范围内。

(2) 调压性能。

1) 稳态电压调整率。机组在调定的稳态调速率下热态运行, 负载在空载到满载, 功率因数在 0.5 (滞后)~0.8 (滞后) 范围内变化时, 不带自动电压调整器的励磁系统, 其稳态电压调整率应不超过额定电压的 $\pm 4\%$ 。带有自动电压调整器的励磁系统而未加调差的, 其稳态电压调整率应不超过额定电压的 $\pm 2\%$ 。

参与并联运行的发电机组的稳态电压调整率应相互接近, 且单机稳态电压调整率应在规定范围内尽量逼近上限, 这样有利于并联运行机组的稳定性及无功功率的均衡分配。

2) 瞬态电压变化率。机组在空载工况下, 突加电流为额定电流的 50%、功率因数不超过 0.4 (滞后) 的三相平衡负载时, 在发电机输出端测得的瞬态电压调整率应不超过额定电压的 13%。恢复并保持与最终稳定电压的偏差: 对带有自动电压调整器的励磁系统为 $\pm 2\%$, 对不带有自动电压调整器的励磁系统为 $\pm 4\%$ 以内的时间不超过 1.0s。

3) 电压波动率。机组在任意不变对称负载下的电压波动率, 应不超过平均电压的 $\pm 0.5\%$ 。

2.8.3 过载能力

机组应具有能承受 110% 额定功率连续运行 1h 的能力。发电机温升不作考核。两次过载之间的时间间隔应不少于该机组恢复到正常热态的时间, 而最小时间间隔和过载运行累计时间在产品规范中规定。

2.8.4 三相及相间突然短路和稳定短路

机组在自励情况下, 应能受出线端三相和任意两相间突然短路, 持续时间不少于 0.6s, 任何部件应不受损坏, 短

路消除后应能正常运行。

发电机及其励磁系统在稳定短路状态下, 至少应能维持 3.2 倍额定电流的短路电流。

2.8.5 并联运行

(1) 机组应能与其他相似调速特性的机组长期并联运行, 当负载自额定功率的 20%~100% 和功率因数在 0.5 (滞后)~0.9 (滞后) 的范围内变化时, 机组应能长期稳定并联运行并均匀分配有功和无功功率, 其有功功率和无功功率分配差度均不应超过 10%。

(2) 并联运行机组在 20%~50% 额定负载工况下, 起动容量约为最大发电机单机容量 15% 的四极鼠笼式异步电动机时, 其动态过程应能稳定, 并最终达到规定的有功功率和无功功率分配差度要求。

(3) 应采取措施消除并联运行时可能发生的功率交互振荡, 若确实无法消除时, 交互振荡的绝对值应不大于:

1) 对 I 级、II 级精度的调速系统为 10%。

2) 对 III 级精度的调速系统为 12.5%。

2.9 安全性设计

(1) 气缸安全阀。气缸直径大于 230mm 的柴油机, 每个气缸盖上应装有安全阀, 此阀应在不超过 1.4 倍最大燃烧压力时开启。安全阀排气口的位置应使排出的气体不致造成危害。对于辅机, 气缸安全阀也可由可靠的气缸超压报警装置代替。

(2) 曲轴箱及安全阀。

1) 曲轴箱和曲轴箱门应有足够的强度, 且曲轴箱门应可靠地固定, 以免曲轴箱爆炸时脱开。

2) 曲轴箱安全阀应经型式认可, 其结构应能在排出气体后迅速关闭, 以防止空气随后冲入, 安全阀的开启压力应不超过 0.02MPa。

3) 安全阀的排气应用防火罩屏蔽或采用阻火装置, 以尽可能减少窜出的火焰造成危险和损伤。

4) 气缸直径小于 200mm 和曲轴箱总容积小于 0.6m³ 的柴油机, 可以不设安全阀。

5) 气缸直径等于和大于 200mm 但不超过 250mm 的柴油机, 靠近曲轴箱的两端至少各装有 1 个安全阀。但如曲拐数超过 8, 则应在靠近柴油机中部另设 1 个安全阀。

6) 气缸直径大于 250mm, 但不超过 300mm 的柴油机, 每隔一个曲拐至少应装 1 个安全阀, 但其总数不少于 2 个, 若曲拐数为奇数, 则安全阀应从端部设起。

7) 气缸直径等于和大于 300mm 的柴油机, 每一曲拐至少应装 1 个安全阀。

8) 对总容积超过 0.6m³ 的曲轴箱分隔空间, 例如驱动凸轮轴的齿轮箱或链条箱或其他类似装置, 也应设置安全阀。

9) 曲轴箱上所设安全阀总的通流面积按每 1m³ 曲轴箱容积计算应不小于 115cm², 且每个安全阀的通流面积应不小于 45cm²。

10) 在确定曲轴箱容积时, 可扣除曲轴箱内固定部件所占的容积。

11) 原则上曲轴箱应避免使用透气管和可能使外部空气流进曲轴箱的任何装置。曲轴箱如设有透气管时, 应按实际可行使透气管尽量小些。

12) 两台或多台柴油机的透气管不允许相互连接, 也不允许曲轴箱的泄油管相互连接。

13) 若强制从曲轴箱内抽气 (如为了探测油雾), 则曲

轴箱内的真空度应不超过 250Pa。

14) 柴油机曲轴箱油雾指示或轴承温度控制系统的设置应满足《钢质海船入级与建造规范》第7篇的要求。

15) 在机舱的醒目部位,特别是在柴油机每侧的曲轴箱门上或在机舱控制台上应设置警告标牌。警告标牌上应标明:无论何时,若怀疑曲轴箱内温度过高,则在柴油机停机后未经过足够的时间让曲轴箱内充分冷却之前,不得打开曲轴箱门或观察孔。

(3) 滑油系统。

1) 柴油机滑油系统的设计和安装应满足在横倾或纵倾时能正常工作。

2) 功率超过 37kW 的柴油机应装有当其滑油系统故障时发出声和光信号报警装置。

3) 当滑油压力极低时,柴油机应紧急停机。

(4) 冷却系统。

1) 采用油或水冷却活塞的大型低速柴油机,在每个活塞冷却液的排出管上,应装有温度表和观察冷却液循环情况的装置。

2) 柴油机的冷却系统应设高温报警装置,当冷却水温过高时,机组应能自动停机。

3) 应设置冷却水液位低报警装置。

(5) 燃油系统。

1) 对 2002 年 7 月 1 日以后建造的国际航行 500 总吨及以上货船和所有客船,高压燃油输送管应满足《钢质海船入级与建造规范》第 6 篇的有关规定。

对国际航行 500 总吨以下货船和非国际航行船舶,气缸直径等于和大于 250mm 的主、辅柴油机,其高压燃油管应可靠地加以防护和固定,以防止燃油或油雾喷射到机器或其周围处的着火源。所漏出的燃油应泄至适当的集油柜中。

对于无人机舱的柴油机,则不论其缸径的大小,高压燃油管均应予以套管保护。若套管采用软管时,软管应为认可型式。

2) 在 V 型气缸的柴油机上,如果燃油系统布置在两列气缸之间,则应设置适当的防护和漏油排泄管路。

3) 漏出的燃油应在无压力状态下安全地排出,应注意确保漏出的燃油不会混入柴油机的润滑油。

4) 若柴油机安装在弹性基座上,应在柴油机和燃油供应管之间连接处设置挠性接头。

5) 日用油箱应设置低液位报警。

6) 除柴油机的电子调速器应设置最大油门外,柴油机上还应有油门齿杆限位装置。

(6) 排气系统。

1) 气缸直径等于和大于 200mm 的柴油机,每缸应装有测量排气温度的仪表。

2) 柴油机的排气管应设有效的消声器。

3) 每台柴油机应有独立的排气管,以防止排气倒流。如两台或多台柴油机的排气通向共同的消声器、废气锅炉或经济器时,每根排气管应装设烟气隔离装置。

4) 柴油机排气管若在载重水线附近引出舷外时,应设有防止海水从排气管进入柴油机内的装置。

5) 应设置排气温度高报警装置。

(7) 起动空气系统。

1) 每台空气压缩机的排出管应直接接至每只起动空气瓶。在压缩机和空气瓶之间应设有油、气分离器或过滤器,用以分离并泄放压缩机排气中所含的油和水。

2) 从空气瓶到主、辅柴油机的起动空气管路应与空气

压缩机的排出管完全分开。

3) 大型低速柴油机的起动空气总管上应装有安全阀,安全阀的开启压力为最高起动压力的 1.1 倍。在通往柴油机的起动空气管路上应设有截止止回阀或等效设施,以保护压缩空气管路不受气缸内爆炸气体的影响。

4) 气缸直径大于 230mm 的柴油机的起动空气系统应安装火焰阻止器,对可直接换向的柴油机装于每一起动阀处,对不可换向的柴油机则可装于起动空气总管上。

(8) 超速保护装置。

1) 额定功率大于 220kW 的带动发电机的柴油机,应装有超速保护装置,当柴油机转速超过额定转速的 115%,柴油机应紧急停机。

2) 超速保护装置应是与调速器完全分开的独立的运行系统。

(9) 柴油机及其管路需要隔热的高温表面,应包扎隔热材料。

(10) 发电机从电网脱离后 100ms 内,流经三相定子绕组中的电流,至少有一相的电流大于 30% 发电机额定电流(该电流由安装在定子绕组星形点附近的电流互感器检测),则由监控系统触发快速灭磁。

(11) 当发电机自动电压调节器(AVR)失控时,发电机电压不得超过额定电压的 115%。

(12) 发电机绕组温度过高时,输出主开关跳闸信号。

(13) 并联运行时,若发电机出现作为电动机旋转的现象,则用时间和限值两者结合的方式来进行逆功保护。

(14) 采用闭式冷却的发电机应带有海水泄漏报警装置。

(15) 机组外露的运动部分应设防护罩,以保护操作人员的安全。

(16) 机组不带电的金属部分应可靠接地,带电部位在人可触及处必须有良好的绝缘防护层,机上敷设的电缆应采取机械防护措施。

2.10 自动化设计

2.10.1 柴油机的自动控制

主发电机的原动机——柴油机的自动控制原理与应急发电机大致相似,所不同的是,应急发电机组处于应急的备用状态,只要环境条件许可就必须起动。主发电机处于正常的备用状态,除了满足正常的交换机组的自动控制外,还要满足在异常情况下的交换机组的自动控制。起动/停机运行要考虑到对机械寿命的影响。在备用状态所采取的措施是:冷却水(淡水)的预加热和转动部位的预润滑。

冷却水预加热是机组起动直接加速到额定转速所必须采取的措施。在调试或运行时,只要知道柴油机是否处于预热状态,决定是否起动运行。

柴油机在起动运行之前,操作人员要先起动预润滑油泵,向各转动部位注入润滑油,约 2~3min 后才起动柴油机,待机运转后,机带滑油泵工作,关闭预润滑油泵。

在预润滑油泵的起动器内加一个定时器,自动控制泵的运行——接通运行一段时间(0.5~2h);间歇一段时间(1~4min)。大多数柴油机自动控制装置和电站自动控制系统都具有控制预润滑的功能,可直接控制泵的定时运行。

2.10.2 控制功能

柴油发电机组自动控制的基本要求是:

(1) 在机旁可设置机组的运行操作方式。

(2) 接受手动起动指令,只进行一次起动操作(无论成功与否)。

(3) 接受自动起动指令, 一次起动失败允许按设定的次数再次起动。

(4) 起动运转达到“发火转速”, 断开起动输出。

(5) “超速”时应立即停机。

(6) 至少要处理“滑油低压”和“冷却水高温”故障, 按需要停机或报警。

(7) 正常运转后发出“运转”信号。

(8) 机组可运行时向自动控制系统发出“机组可控”信号。

要注意, 对“遥控”和“自动”两种操作, 有的控制器的操作功能是一样的; 有的有区别, 即“遥控”只允许进行一次起动操作 (无论成功与否), “自动”则可设定多次。

根据要求还可附加其他功能, 例如冷却水预热、预润滑、多路故障处理、起动输出改变 (电起动、气起动) 等。

2.11 参数设定与调整

2.11.1 稳态调速率可调范围检查

将调速器上的稳态调速率调节旋钮置于最小位置, 机组负载逐步增加到额定有功负载, 并使机组转速为额定转速, 再逐步卸去全部负载, 记录此时机组的空载转速或频率。将调速器稳态调速率旋钮置于最大位置, 重复上述试验。分别求出稳态调速率的最小值和最大值。

2.11.2 稳态调速特性测定

机组稳态调速率调到预定值时, 使机组带额定有功负载, 转速为额定转速, 固定调速机构。机组负载从 100% 额定负载到空载; 再从空载到 100% 额定负载, 单方向缓慢地改变机组负载 (不允许在某一负载点来回调整), 在加载和减载方向应安排不少于 5 个间隔大致相等的点, 测量负载改变后的稳态转速或频率及相应的机组功率。试验应至少连续进行 3 次, 每次得到的转速特性曲线 (负载—转速特性) 应基本重合。求出调速系统的不灵敏度 ϵ 和调速特性的非线性度 γ , 稳态调速率 δ_{st} 。

2.11.3 转速波动率测定

机组在额定转速下运行, 用示波器 (配瞬时转速测量仪) 或其他类似的记录器分别记录空载, 20%、50%、75% 和 100% 额定负载时的转速变化, 示波器的拍摄速度应不小于 100mm/s。在每一负载状态下, 机组应稳定运行 5~10min, 记录时间应不短于 10s。

2.11.4 瞬态调速及其恢复时间测定

发电机在自动电压调节器的控制下, 机组在额定转速、额定电压和额定有功负载下运行 5~10min 后, 突卸额定有功负载。用示波器 (配瞬时转速测量仪) 或其他类似的记录器记录转速的变化。该试验应连续做三次 (一次试验稳定后再进行下一次), 试验结果应取三次试验的平均值 (但三次试验的测量数据均需提提供)。

2.11.5 空载电压整定范围检查

机组转速升到空载转速, 发电机应自行起励建压, 发电机的空载电压应稳定在电压调整率范围内。

调节电压整定装置, 观察电压的整定范围是否为 95%~105% 空载电压。

2.11.6 稳态电压调整率测定

机组在热态下整定于额定功率、额定转速、额定电压、功率因数为 0.8 (滞后) 后卸载。分别保持功率因数为 0.5、0.8、0.9 (滞后), 使机组负载从空载到 100% 额定负载, 再从 100% 额定负载到空载, 单方向缓慢变化。在各单程变化范围内, 应至少安排间隔大致相等的 5 个测试点, 其中应

包括 20% 额定负载点, 记录各点的负载、电流、电压和频率值, 功率因数为 0.5 (滞后) 时额定负载以电流计算, 在功率因数为 0.8、0.9 (滞后) 时额定负载以功率计算。

2.11.7 电压波动率测定

在功率因数分别为 0.5、0.8、和 0.9 (滞后) 的情况下, 使机组在空载、20%、50%、75% 和 100% 额定负载下运行, 用示波器或其他类似仪器记录电压波动情况。记录速度应不低于 25mm/s, 该项目在质量一致性检验时可用电压表测量。

2.11.8 瞬态电压调整率及其恢复时间测定

机组在稳态调压率测定后, 于机组空载时突加功率因数不超过 0.4 (滞后)、输入电流为 50% 发电机额定电流的三相对称负载。用示波器拍摄在突加负载过程中发电机一相电流和三相电压的波形, 同时记录突加前后发电机端电压、相电流的稳态值和功率因数。示波器的拍摄速度应不小于 100mm/s, 稳定电压的迹线幅值不小于 25mm, 拍摄长度不短于 300mm, 选取合闸相角小于 15° (电角度) 的电压波形。

2.12 机组的试验、使用和维护

2.12.1 机组的试验

(1) 试验目的。通过试验, 验证设计的准确性和合理性, 检查加工、制造和装配的准确性和符合性, 使机组能够按技术规格书的规定协调正常, 稳定可靠地工作, 在客观试验条件允许的情况下, 应尽可能地对机组的规定功能进行全面考核。

(2) 最终试验。柴油发电机组的出厂试验项目一般包括: 外观检查、绝缘电阻检查、试运转检查、起动性能试验、稳态调速率可调范围检查、稳态调速特性测试、转速波动率测定、瞬态调速率和稳定时间测定、空载电压整定范围检查、稳态调压率测定、电压波动率测定、瞬态电压变化率及恢复时间测定、噪声测定、扭振测量、负载试验、燃油消耗率测定、过载试验、超速保护装置试验、三相突然短路试验和稳态短路电流的测定、并联运行试验、机械振动测定等, 具体可在技术规格书中与用户商定, 试验方法按相关标准的要求并应得到用户认可。

2.12.2 机组的使用

柴油机作为结构复杂的原动机, 它的使用情况对整个柴油发电机组的安全可靠和经济运行有重要意义。各类型号的柴油机的结构和性能不尽相同, 应按设备制造厂的《使用维护说明书》中的要求进行操作, 下面简单介绍一些使用中的主要问题。

(1) 保证良好的润滑。实践证明, 保持润滑油的清洁, 提高润滑效果, 对柴油机的安全经济运行有很大影响。所以在日常运行中, 要经常清洗润滑油过滤器, 有的还采用了在润滑油中加二硫化钼的办法提高润滑效果, 使润滑油中的炭减少结渣, 从而减轻了柴油机转动部分磨损, 延长使用寿命。

(2) 增压器的运行。增压器在运行时应严格遵循制造厂的有关规定, 转速不应超过额定的最高转速, 涡轮增压器的入口气温不得超过允许的最高温度。除了紧急情况以外, 柴油机不应在带负荷时停机。如必须停机时, 应开动辅助油泵向增压器供油 0.5~1min, 在高负荷紧急停机时, 应使向增压器供油的时间加长到 15min 左右。

在运行中, 还要经常检查柴油机气缸的进气压力和排气压力、轴承温度、冷却水温度和压力, 注意倾听和观察增压

器的运行是否平稳,特别是增压器的涡轮和压气机的转子,不能有偏心或其他不平衡现象,以免引起过大的振动。

(3) 加强巡回检查。为保证机组的安全运行,应严格遵守各项安全操作规程,加强对机组的巡回检查工作。

2.12.3 机组的维护

(1) 柴油机的维护。只有严格按照制造厂维修手册的要求对柴油机进行维护,才能满足运行准备要求,达到运行可靠以及运行和维护费用较低的目的。

如果柴油机在较长时间内不运行,则要在空气进气道喷入润滑油,此时的维修周期按规定的极限值进行,柴油机每月还需要手动盘车一次;如果柴油机停机三个月以上,要按维修手册的要求将柴油机油封起来。

连续运行的柴油机,它的转动部分容易发生故障。柴油机的重大故障主要有五个方面:

1) 曲轴折断。为了防止曲轴折断,必须保证曲轴在运行时有正确的中心线,减少轴颈及曲臂承受反复应力。加强对臂距差的检查,保证轴颈椭圆度和锥度都在允许范围内。要严格禁止盲目超负荷、超转速以及在临界转速下运行。运行中,要尽量防止有紧急停机现象,以免曲轴折断。当柴油机突然振动增大,并发现有异常声响时,应立即停机检查,在没有查明原因并加以消除前不得再行开机。

2) 连杆螺栓折断。为了防止连杆螺栓折断,连杆螺栓材料应符合要求,一般采用中炭优质镍铬钢或镍铬钼钢。连杆螺栓毛坯要求锻造后加工,不能用钢材直接车削。连杆螺栓应无任何裂纹、损伤、锈蚀等缺陷,杆身无弯曲,螺栓头和螺母支承面必须与杆身中心线垂直,杆径增缩处必须圆角,以减少应力集中。连杆螺栓的安装和检查应严格按照制造厂的要求进行。

3) 主动件磨损。为了防止轴颈与轴瓦、活塞销与铜套、活塞环与气缸壁等主动件的过早磨损,首先要在运行中加强润滑工作,保证摩擦面的润滑良好,按照柴油机的要求和环境温度正确选择合适的润滑油,注意保持柴油机的润滑油压和出油温度在规定范围之内。

4) 气缸拉损。运行中发现有拉缸象征时,应减少负荷或停机检查。在每次更换缸套或活塞环后必须要经过试车阶段,每班试车完毕后应分别停机检查。应定期清洗气缸水套,保证良好的散热效果,冷却水进、出口水温差最大不超过 20°C 。要定期检查活塞与缸套,如果发现超过磨损限度时应及时予以更换。在小修时应清扫燃烧室及活塞,特别要注意活塞环不能有积炭咬死现象。

5) 气缸盖、气缸套、活塞、机体炸裂。为防止这类事故发生,在运行中,当发现出水温度过高时,应减少负荷并徐徐开大冷却水阀。如发现端水时应立即停机,待其自然冷却后再进水开机,切忌骤进冷水。要定期清洗水套及气缸盖,冷却水压不宜超过 0.245MPa ,以免气缸套橡皮圈处漏水。气缸盖和气缸套在安装后应进行水压试验。紫铜气缸垫每使用一次应进行退火,以免过硬不宜压合。禁止在热状态下过度收紧气缸盖螺栓,以免引起气缸盖或机体损坏。

(2) 发电机的维护。在进行发电机的任何维护工作前,务必使电机与电源脱开,并有防止电机被意外起动的防范措施。

如果灰尘或潮气渗入出线盒内,就应仔细地擦干净并烘干出线盒,特别是其中绝缘部件的表面。同时也应检查其密封部件和密封表面,并排除密封不良的原因。

3 汽轮发电机组

3.1 基本原理

来自锅炉或其他汽源的蒸汽,经主汽阀和调节阀进入汽轮机内,依次流过一系列环形配置的喷嘴(或静叶栅)和动叶栅而膨胀做功,其热能转变成推动汽轮机转子旋转的机械功,从而驱动发电机。膨胀做功后的蒸汽由排汽部分排出机外。电站中常用的凝汽式汽轮机,其排汽被引入凝汽器而凝结,凝结水再经泵输送至加热器中加热后作为锅炉给水,循环使用。

汽轮机本体主要由静子和转子两大部分组成。静子包括汽缸、隔板和静叶栅、进排汽部分、端汽封以及轴承、轴承座等。转子包括主轴、叶轮和动叶片(或直接装有动叶片的鼓形转子、整锻转子)、联轴器等。为了保证安全和有效的工作,汽轮机还配置有调节保安系统、汽水系统、油系统及各种辅助设备。

3.2 参数和指标

3.2.1 参数

汽轮发电机组的主要参数包括额定功率、额定电压、额定电流、额定频率、额定功率因数、相数、额定转速、发电机工作制和绝缘等级、机组质量和外形尺寸等。此外,还包括汽轮机的主要参数如主蒸汽压力、主蒸汽温度、排汽压力、汽耗量、抽气器进汽压力和汽耗量、汽轮机额定转速和极限转速、冷却水进口压力和进口温度等。

3.2.2 主要性能指标

汽轮发电机组的主要性能指标有:

(1) 调速性能。

- 1) 超速自动脱扣装置的动作值。
- 2) 稳态调速率的调节范围。
- 3) 稳态调速率。
- 4) 瞬态调速率及恢复时间。
- 5) 调速器遥控伺服机构的调速灵敏度。

(2) 调压性能。

- 1) 稳态电压调整率的调节范围。
- 2) 空载电压调整范围。
- 3) 限制过电压的整定值。
- 4) 稳态电压调整率。
- 5) 瞬态电压调整率及恢复时间。

(3) 电压波形。

- 1) 线电压波形偏离系数。
- 2) 线电压波形的正弦性畸变率。
- (4) 并联运行。

1) 机组并联运行时,当负载在总额定功率的 $20\%\sim 100\%$ 、功率因数在 0.5 (滞后)~ 0.9 (滞后)的范围内变化时,机组应能长期稳定并联运行。每台机组的有功功率和无功功率分配差度均不应超过 10% 。

2) 并联运行机组在 $20\%\sim 50\%$ 额定负载工况下,起动容量约为最大发电机单机容量 15% 的四极鼠笼式异步电动机时,其动态过程应能稳定,并最终达到规定的有功功率和无功功率分配差度要求。

3) 应采取措施消除机组并联运行时可能发生的功率交互振荡,或将其降低至规定限值。

4) 若有要求,汽轮发电机组应能与柴油发电机组或燃气轮机发电机组长期稳定并联运行。

此外，汽轮发电机组还有起动、短路、不对称负载、噪声、机组振动、扭转振动等性能指标，这里不多介绍。

3.3 原动机的选型

3.3.1 汽轮机的种类

汽轮机可以按照工作原理、热力特性、汽流方式、蒸汽初压等不同方面进行分类，见表 3.2-3。

表 3.2-3 汽轮机的分类

分类	型 式	简 要 说 明
按工作 原理	冲动式汽轮机	蒸汽主要在喷嘴（或静叶栅）中进行膨胀
	反动式汽轮机	蒸汽在喷嘴（或静叶栅）和动叶栅中都进行膨胀
按热力 特性	凝汽式汽轮机	排汽在低于大气压力的真空状态下进入凝汽器凝结成水
	背压式汽轮机	排汽压力大于大气压力，排汽供热用户或低压汽轮机使用
	抽汽式汽轮机	利用调整抽汽供热的汽轮机，有一级调整抽汽式和二级调整抽汽式
	抽汽背压式汽轮机	具有调整抽汽的背压式汽轮机
	乏汽式汽轮机	利用工业设备的低压排汽或企业废汽工作，进汽压力通常较低
	多压式汽轮机	利用其他来源的蒸汽引入汽轮机相应的中间级，与原来的蒸汽一起工作
按汽流 方式	轴流式汽轮机	在汽轮机内，蒸汽基本上沿轴向流动
	辐流式汽轮机	在汽轮机内，蒸汽基本上沿辐向（径向）流动
	周流（回流）式汽轮机	蒸汽大致沿轮周方向流动的小功率汽轮机
按蒸汽 初压	低压汽轮机	汽轮机的进汽压力为 0.12~1.5MPa
	中压汽轮机	汽轮机的进汽压力为 2~4MPa
	高压汽轮机	汽轮机的进汽压力为 6~10MPa
	超高压汽轮机	汽轮机的进汽压力为 12~14MPa
	亚临界汽轮机	汽轮机的进汽压力为 16~18MPa
	超临界汽轮机	汽轮机的进汽压力>22.6MPa

3.3.2 参数选择

汽轮机主要参数的合理选择，对于整个机组的经济性有很大的影响。

(1) 蒸汽初参数。在选定某一蒸汽初温条件下，通常有一个最佳的蒸汽初压值，这时汽轮机装置的热经济性最高。因此，在提高蒸汽初压值的同时，也应该相应的提高蒸汽初温值。

蒸汽初温值的提高，主要受到高温耐热钢的性能限制。从技术经济性和运行可靠性考虑，中压（及以下）机组的蒸汽初温值大多采用 400~450℃，以便广泛采用碳素钢材；高压（及以上）机组的蒸汽初温值一般采用 520~565℃，

多数情况下采用 535℃；这样，就可以避免采用高价的奥氏体钢材，而采用低合金元素的珠光体钢材。

蒸汽初压的选择，主要受到汽轮机末级叶片允许的最大湿度限制；根据末级叶片金属材料的强度计算，一般要求使汽轮机排汽的最大含湿量不超过 12%~14%。大容量的汽轮发电机组由于采用蒸汽的中间再热和给水的多级回热循环，因而有利于蒸汽初压的提高。目前大型机组的蒸汽初压一般采用超高压（13MPa）和亚临界压力（17MPa），个别试验性机组采用超临界压力（24.7MPa）。

(2) 汽轮机背压。汽轮机背压的合理选择，与冷却水温度（取决于大气温度及冷却方式）、末级叶片的尺寸、汽轮机和凝汽设备的投资费用以及燃料费用等因素有关。

凝汽式汽轮机选用的背压值见表 3.2-4。

表 3.2-4 凝汽式汽轮机排汽参数

冷却水温度（℃）	背压值（MPa）
10	$(3\sim4)\times10^{-3}$
20	$(5\sim6.5)\times10^{-3}$
27	$(7\sim8)\times10^{-3}$

(3) 中间再热蒸汽参数。对应于一定的蒸汽初参数、汽轮机背压和再热温度的情况下，有一个最佳的再热蒸汽压力，这时中间再热循环的热效率最高。通常，当再热温度等于蒸汽初温时，最佳的再热蒸汽压力约为蒸汽初压的 18%~26%。

合理的再热蒸汽压力，还要结合考虑汽轮机最高一级的回热抽汽压力、汽缸结构、高中压汽缸的功率分配以及轴向推力的平衡等问题，在最佳值附近选定。

再热系统（包括管道及再热器）的压力损失一般取再热压力值的 10%~12%。

3.3.3 单机容量

单机容量较大的汽轮发电机组，单位功率的设备投资费用较低，运行时的热效率较高，发电成本也比较低。

汽轮机的单机容量受汽轮机低压部分的末级排汽尺寸（平均直径和叶片长度）影响。末级叶片长度的制造工艺水平，往往限制了汽轮机的功率增加。通常在某一种末级叶片长度的情况下，单排汽口的汽轮机往往有一个最大极限容量。因此，要扩大机组的单机容量，一般都要增加排汽口数目，采取分流方式。

3.4 功率匹配性设计

根据汽轮机的功率修正曲线或给定的方法（一般由制造厂给出），将汽轮机的输出功率修正到该机在要求的使用环境下输出的功率值 P_{HY}

$$P_{HY} \geq \frac{P_{HF}}{\eta_G} \tag{3.2-18}$$

式中： P_{HY} 为汽轮机经环境修正后的输出功率，kW； P_{HF} 为机组额定功率，kW； η_G 为包括发电机效率和减速齿轮箱的机械效率，%。

3.5 热循环设计

汽轮发电机组的热力循环方式经历了由简单到复杂的发展过程，目前，船舶汽轮发电机组普遍地采用给水的多级回热循环和蒸汽的中间再热循环。此外，双工质复合循环的研究和应用也有很大的发展。

热力循环及其主要参数的合理选择,对汽轮发电机组的设计和运行都有很密切的关系。通常,应该根据设备的热经济性以及工作的安全可靠性等方面进行全面的分析比较后选定。

3.5.1 简单循环

理想的简单循环即郎肯循环 (Rankine cycle),它是蒸汽动力装置工作的理论基础,其循环示意图见图 3.2-7。

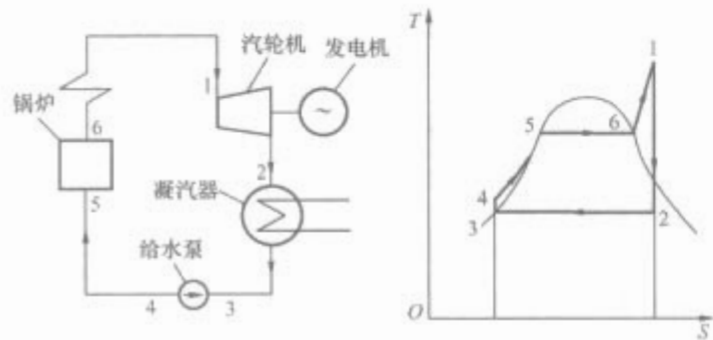


图 3.2-7 简单的蒸汽动力装置及郎肯循环 T—S 图

郎肯循环的工作过程是:工质(水)在锅炉中定压加热、汽化和过热(4-5-6-1);蒸汽在汽轮机中等熵膨胀做功(1-2);排汽在凝汽器中定压凝结放热(2-3);凝结水经水泵等熵压缩后进入锅炉(3-4)。

郎肯循环的热效率 η_h ,表示每千克工质在循环中产生的净功 AW_1 与其从锅炉(热源)中吸收的热量 q_0 之比,即

$$\eta_h = \frac{AW_1}{q_0} = \frac{(i_1 - i_2) - (i_4 - i_3)}{(i_1 - i_3) - (i_4 - i_3)} \quad (3.2-19)$$

忽略水泵的耗功,则上式可简化成

$$\eta_h \approx \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3} = \frac{H_0}{i_1 - i_3} \quad (3.2-20)$$

式中: i_1 为汽轮机进口的蒸汽焓, kJ/kg; i_2 为汽轮机排汽的蒸汽焓, kJ/kg; i_3 为给水泵进口的给水焓, kJ/kg; i_4 为给水泵出口的给水焓, kJ/kg; H_0 为汽轮机的有效焓降, kJ/kg; $i_1 - i_2$ 为汽轮机的焓降,即每千克蒸汽在汽轮机中等熵膨胀产生的理想功; $i_4 - i_3$ 为每千克水在给水泵中的加热量,即给水泵消耗的等熵压缩功。

由上式可见,提高郎肯循环热效率的主要途径是提高汽轮机的进汽压力和温度、降低汽轮机的背压以及采用一些复杂循环,如给水多级回热、蒸汽中间加热、热电联合生产和双工质复合循环等。

3.5.2 回热循环

从汽轮机的某些中间级后抽出作过功的部分蒸汽,用以加热给水,称为给水回热,其循环示意图见图 3.2-8。

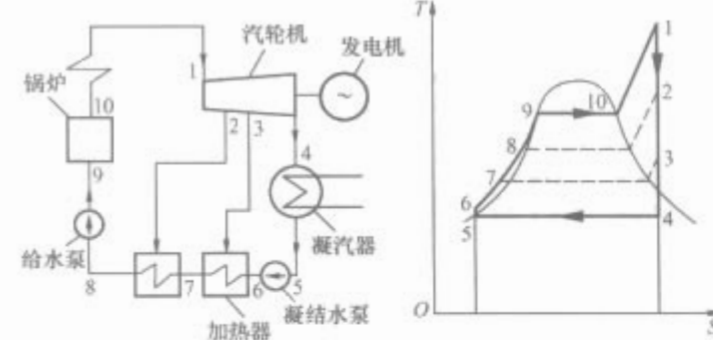


图 3.2-8 具有给水回热的汽轮机装置及循环示意图

采用给水回热后,由于汽轮机抽汽的热量被用于提高给水温度,使排汽对冷源的放热量(冷源损失)大为减少,因此在汽轮机的蒸汽初、终参数相同的情况下,给水回热循环

的热效率比郎肯循环有显著地提高。

在其他条件不变时,回热的给水温度越高,回热的级数越多,则回热循环的热效率也将越高。但是,当回热级数选定为一定值时,回热的给水温度有一个最佳值,此时回热循环的热效率最高。过分提高回热的给水温度值,将使回热抽汽的做功量减少,给水回热的经济效益反而降低,见图 3.2-9。

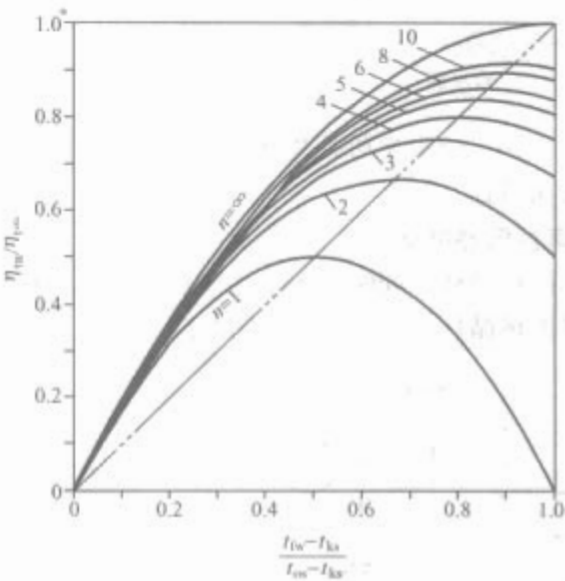


图 3.2-9 给水回热级数的经济效益

η_{1w} —有限级回热的热效率。

η_{1m} —无限级回热的热效率。

各种机组采用给水回热循环的热经济效果见表 3.2-5。

表 3.2-5 给水回热循环的热经济性

蒸汽初参数		回热级数 n	给水温度 t_{1w} (°C)	相对效益 (%)
p_0 (MPa)	t_0 (°C)			
2.4	390	1~3	105~150	6~7
3.5	435	3~5	150~170	8~9
9	535	6~7	210~230	11~13
13/13.5	535/535	7~8	220~250	14~15
16.5	535/535	7~8	245~275	15~16
24	565/565	8~9	270~300	17~18

3.5.3 再热循环

将作过一段功的蒸汽从汽轮机的某一中间级全部引出,送到锅炉的再热器中再加热,提高温度后又引入汽轮机,在以后的级组中继续膨胀做功。这种热力循环称为中间再热循环,其循环示意图见图 3.2-10,也可以看作是由基本循环(郎肯循环) 1—2'—5—6—7—8—1 和再热附加循环 3—4—2'—2—3 所组成的复合循环。

采用蒸汽的中间再热循环,可以使低压部分的蒸汽湿度减小,改善汽轮机末几级叶片的工作条件。这样可提高其相对内效率,使每千克蒸汽的绝热焓降增大,并使循环能够采用更高的蒸汽初压,增大单机容量,从而有效地提高机组的热经济性。一般采用一次中间再热循环可使机组的热经济性相对提高约 5% 以上。如采用二次中间再热循环,可以再提高约 2% 左右。

由于采用中间再热循环,将使汽轮机的结构、布置及运行方式复杂,金属消耗及造价增加,调节系统要求提高,从而增加设备投资和维护费用。因此,通常是在 10 万 kW 以上的大容量高参数汽轮机组中才被采用,并且多数只采用一

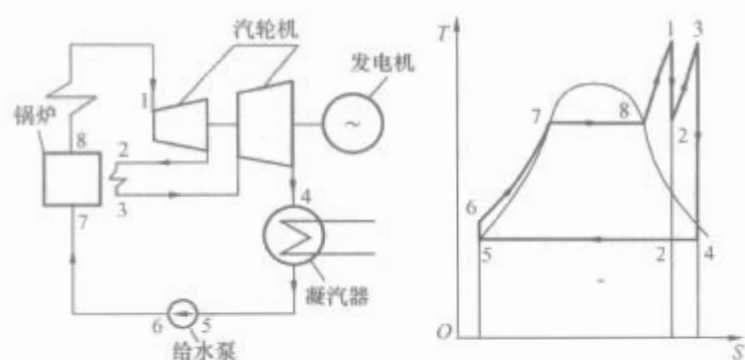


图 3.2-10 一次中间再热汽轮机装置及循环示意图

次中间再热循环。

3.5.4 再热回热循环

再热回热循环即同时采用上述蒸汽的中间再热循环和给水的多级回热循环，其示意图见图 3.2-11。

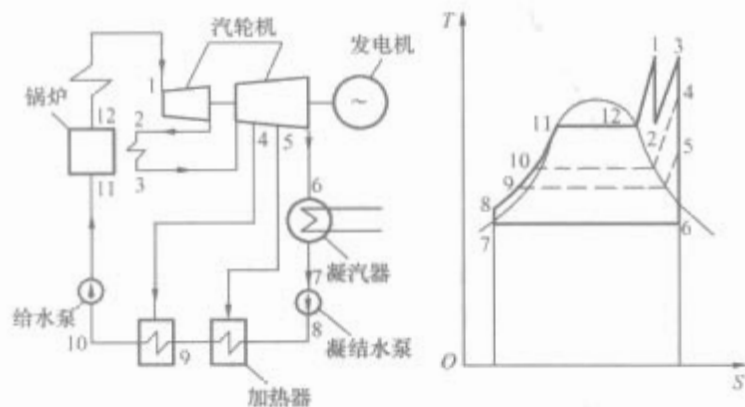


图 3.2-11 再热回热循环装置示意图

3.5.5 热电循环

利用汽轮机做过功的蒸汽（抽汽或排汽）满足热用户的供热需要，这种即供热又发电的热力循环称之为热电循环。

汽轮机供热的方式有两种：背压式供热和抽汽式供热。

背压式供热是利用背压式汽轮机的排汽供给热用户使用。

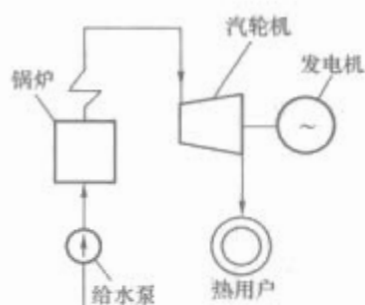


图 3.2-12 背压式供热装置示意图

用。这种装置的示意图见图 3.2-12。由于排汽的热量不是放给冷源，而是全部供给热用户使用，因此燃料的热量在理论上被全部利用（实际上还存在散热及工质漏泄等损失）。由于这种循环的发电功率取决于供热负荷的大小，往往不能同时满足船舶上热

用户和电用户的负荷需要。

抽汽式供热是利用调整抽汽式汽轮机，调整抽汽供应热用户需要。其装置示意图见图 3.2-13。这种装置，在发出同样的电功率时，由于大量的供热抽汽，使排汽流量和冷源损失大为减少，从而提高了燃料的热量利用率。而且这种装置的发电功率可以借改变凝汽流量的大小而得到调节，能够在较大范围内同时满足热用户和电用户的负荷需要。

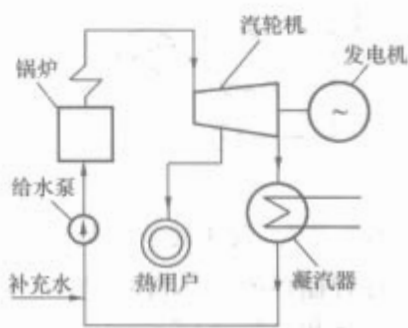


图 3.2-13 抽汽式供热装置示意图

3.6 回热系统设计

汽轮机的回热系统是指利用汽轮机的各级抽汽在逐级的给水加热器中将给水加热到一个合适的给水温度值所配备的一整套回热装置，主要包括低压加热器、除氧器、高压加热器和给水泵等。回热系统的示例见图 3.2-14。

3.6.1 给水温度

理论上的最佳给水温度值可以按照下列方法计算得出：对于已定为 n 级无损失的回热循环，可按等温升的分配原则，先算出理论上的最佳给水温度值如下

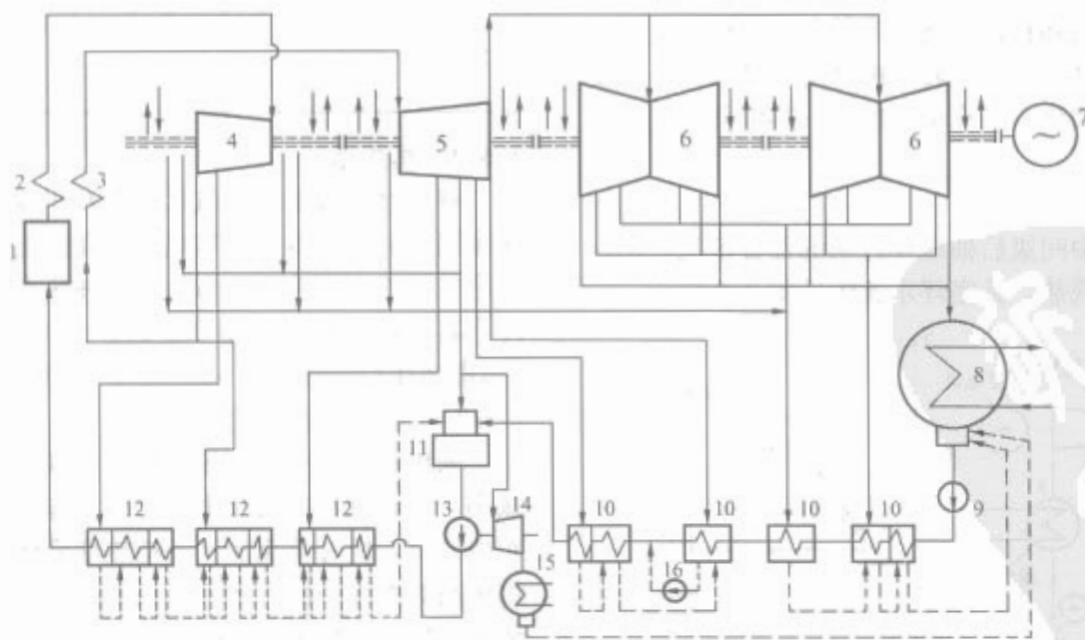


图 3.2-14 大容量机组的给水回热系统

- 1—锅炉；2—过热器；3—再热器；4—高压缸；5—中压缸；6—低压缸；
- 7—发电机；8—凝汽器；9—凝结水泵；10—低压加热器；11—除氧器；
- 12—高压加热器；13—给水泵；14—驱动给水泵的小汽轮机；
- 15—小汽轮机凝汽器；16—疏水泵

$$t_{fw} = \frac{n}{n+1} (t_{os} - t_{ks}) + t_{ks} \tag{3.2-21}$$

式中： n 为回热级数； t_{os} 为压力为 p_0 时的饱和温度，℃； t_{ks} 为压力为 p_k 时的饱和温度，℃。

但是，合理的给水温度值还与整个装置的综合技术经济性有关。给水温度越高，将使锅炉设备投资增加，或使锅炉排烟温度增高而降低锅炉效率。因此，实际中采用的给水温度值要低于理论上的最佳值，通常也可以取为 $t_{fw} = (0.65 \sim 0.75) t_{os}$ 。

通常采用的给水温度值见表 3.2-5。

3.6.2 回热级数

在回热循环中，为了回热到给定的给水温度值，可以采用较高压力的蒸汽在单级加热器中一次加热，或者采用若干级压力不同的汽机抽汽逐级加热到给水温度，它们从蒸汽中所吸收的热量基本上是差不多的。但是采用了分级加热后，因为低压抽汽比高压抽汽在汽轮机内的相对做功量大，可以减少在一定功率情况下汽轮机的总汽耗量，也相应地减少了通向凝汽器的蒸汽量，使冷源损失减少。因此，对于任何给定的给水温度值，随着回热级数的增多，致使回热系统的热效率逐步提高，所以在绝大多数的汽轮发电机组中均采用了多级抽汽的回热加热系统。

实际上，回热级数并不能无限制的增多。这是因为在给水温度一定时，随着回热级数的增多，热效率的相对增益逐渐减小，而且增设的加热器等设备投资及维护费用也将随之增加。通常采用的回热级数见表 3.2-5。

在回热系统中，当给水温度和回热级数一定时，对每一级的加热程度往往是要求给水的加热焓升或温盛大到合理的分配，以求使汽轮机回热抽汽的作功量最大，整套回热装置将具有最高的热经济性。

通常对于非中间再热机组，给水回热系统大多采用等焓升（或等温升）的分配原则，每级加热器中给水的焓升为

$$\Delta i = \frac{i_{fw} - i'_k}{n} \tag{3.2-22}$$

或温升为

$$\Delta t = \frac{t_{fw} - t_{ks}}{n} \tag{3.2-23}$$

式中： i_{fw} 为给水焓，kJ/kg； i'_k 为背压为 p_k 时的饱和水焓，kJ/kg； t_{fw} 为给水温度，℃； t_{ks} 为压力为 p_k 时的饱和温度，℃； n 为回热级数。

对于中间再热机组，给水的焓升分配应该考虑中间再热后蒸汽焓值的提高对给水回热的影响。通常是使一个加热器的回热抽汽来自再热“冷段”（即进入再热器之前），并使该级给水焓升约为其后一级（再热后的一级）加热器给水焓升的 1.5~1.8 倍，以降低再热后的回热抽汽压力，增加抽汽做功量。再热以后的各级给水加热仍采用等焓升分配原则。如果在再热压力之前还有一级高压加热器时，则该级的给水焓升由给水温度和再热压力决定。

汽轮机的各级回热抽汽压力，是根据各级加热器出口的水温和汽轮机通流部分的分级情况，并考虑加热器的端差和抽汽管的压损之后确定。

加热器的温度端差越小，则热经济性越高，但加热器的面积应相应增大。通常在无过热蒸汽冷却段时，端差取为 $\Delta t = 3 \sim 6^\circ\text{C}$ ，有过热蒸汽冷却段时， $\Delta t = -1^\circ\text{C} \sim 2^\circ\text{C}$ 。加热器端差值的偏差，将直接影响回热循环的经济性。例如，一台大型机组的全部高压加热器的端差若降低 1°C ，可使机组

热耗减少约 0.06%。

从汽轮机到加热器的管道中，因流动阻力造成的抽汽压力损失，取决于管道中的流速、管道尺寸形状以及汽轮机结构和系统布置等因素。通常取汽轮机各级抽汽压力的 4%~8%。

3.6.3 回热装置

给水回热装置是汽轮发电机组的主要组成部分。在给水回热装置中，加热器型式及其连接方式的选择，对回热循环的经济效果和运行可靠性有较大的影响。

实际应用的回热装置，通常是采用一个混合式加热器作为锅炉给水的除氧器，其余都是表面式加热器。一般按抽汽的先后，在除氧器之前的加热器称为高压加热器，在除氧器之后的加热器称为低压加热器。

最广泛采用的是管壳式表面式加热器，管束封闭在外壳内，被加热的给水在管内流动，加热介质（蒸汽）在管外流动。管壳式加热器的分类见表 3.2-6。

表 3.2-6 管壳式加热器的分类

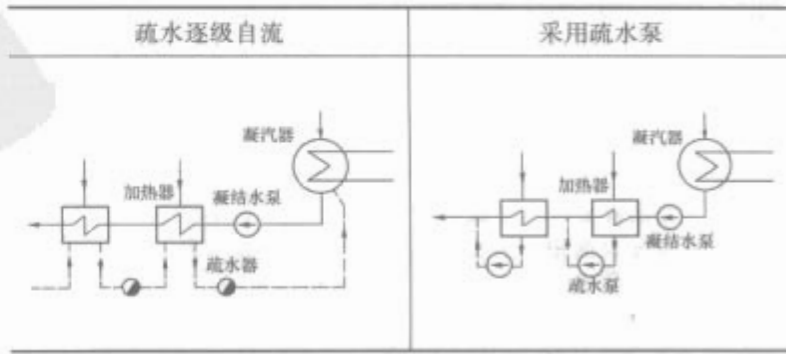
型式	水室结构		联箱结构
	法兰螺钉连接		自密封
适用范围	低压加热器	低压加热器和小型机组高压加热器	大型机组高压加热器
传热面	浮头式（直管）	U 型管	螺旋管
特点	可用小管径薄壁传热管，外形尺寸小，材料消耗少 管子损坏后容易堵漏 管束水阻小 管板和水室均是大锻件，加工工艺复杂，钻孔工作量大 传热管胀接和焊接在管板上		外形尺寸大，材料消耗多 管子损坏后堵漏困难但能换管 管束水阻大 不要管板，钻孔工作量大，但外壳大法兰不易密封 传热管焊接在联箱上

在选择加热器时，要根据回热系统给定的端差和疏水端差，考虑是否采用过热蒸汽冷却段和疏水冷却段，并合理确定不同加热段的传热面积。高参数大容量机组的给水加热器，为了更有效地利用抽汽的过热度 and 疏水的过冷却，常把传热面分为过热蒸汽冷却段、凝结段和疏水冷却段三部分，过热蒸汽冷却段和疏水冷却段是对流换热，传热面用包壳封闭，并以导流板导向，使蒸汽或疏水以一定的速度和方向流经传热面。

加热器是一种压力容器，一般都具有超压保护装置，完善的疏水装置和合理的疏水系统。在各级表面式加热器中，采用不同的疏水排放方式将导致不同的热经济性。

表面式加热器的疏水原则上有两种不同的连接方式，详见表 3.2-7。

表 3.2-7 表面式加热器的疏水方式



续表

疏水逐级自流	采用疏水泵
系统简单,运行可靠 冷源损失大,热经济性差 实际应用较多	疏水热量被利用,热经济性高 系统复杂,设备投资及维护费用较大 在高压加热器中没有采用

此外,在一些不能采用疏水泵的情况下,也可以采用疏水冷却器,如图 3.2-15 所示。这种方式是将上一级的疏水在自流入下一级加热器之前,先用一部分主凝结水流经疏水冷却器中,将上一级加热器的疏水冷却后再排入下一级加热器。疏水冷却方式既可以放在加热器内部作为疏水冷却段,也可以另设单独的疏水冷却器,一般是经过技术经济比较以后选用。

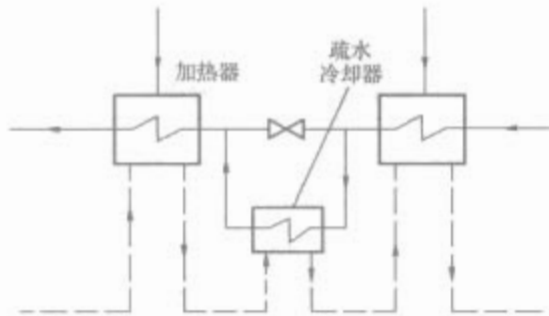


图 3.2-15 采用疏水冷却器的疏水连接方式

3.6.4 除氧装置

除氧装置的主要作用是除去锅炉给水中的氧气,以保证锅炉给水的品质。

给水水质不合标准,不仅对锅炉有害,而且对汽轮机的通流部分及回热系统的设备和管道也会造成腐蚀,减低设备的寿命。例如在给水中溶解氧的含量超过 0.03mg/L 时,短期内就会使给水管路和省煤器中出现穿孔性的点状腐蚀。一般对于 6MPa 以上的给水含氧量应小于 0.01mg/L。

根据水在除氧器中的散布方式不同,除氧器的结构型式基本上可分为淋水盘式、喷雾式和填料式三种类型,其特点见表 3.2-8。

表 3.2-8 除氧器的工作原理及运行特点

类型	工 作 原 理	运 行 特 点
淋水盘式除氧器	凝结水在逐层淋水盘下滴时被蒸汽加热到饱和温度,在加热过程中除氧	传热系数小 体积较大 淋水盘上的小孔易被水垢或腐蚀物堵塞,使传热面积减小,造成出力不足 出水含氧量约为 0.05 ~ 0.10mg/L
喷雾式除氧器	借凝结水泵的压力,用喷嘴将水雾化后被蒸汽加热到饱和温度。大约有 60%~80% 氧气变成小气泡析出,残留的氧气要靠扩散来清除	传热系数大,可达 16 268 ~ 18 592W/(m ² ·K) 加热度大,进水温度不受限制有利于气泡除氧,不利于扩散除氧 体积小,热容量小,运行不当可能造成除氧水过冷现象 出水含氧量约为 0.05 ~ 0.10mg/L
填料式除氧器	凝结水通过一层填料层时增加表面积,使水内的氧气扩散出来,达到除氧的目的	出力大,效果好 加热度不能太大 要用大量的不锈钢皮制作填料层

现在采用的除氧器常常是吸取上列几种类型的特点,取长补短,组成一种综合型式,以保证有较好的除氧效果,例如有喷雾淋水盘式和喷雾填料式等。试验证明,喷雾填料式除氧器的除氧强度可达 16.7~19.4L/m²·s,出水含氧量可小于 0.007mg/L,它所容许的加热度也可以增大,能适应低负荷或低压加热器故障时引起凝结水温降低的异常运行工况,是当前我国采用得比较理想的一种型式。

此外,根据除氧器内的工作压力又可分为真空式、大气式及高压除氧器三种。在中压和低压发电厂中,一般采用大气式除氧器,其工作压力为 0.12~0.25MPa;在高压和超高压发电厂中,大多采用工作压力为 0.6MPa 左右的高压除氧器。真空除氧方式大多在凝汽器内进行,它将汽轮机的主凝结水和送入的化学补充水进行初步除氧。

3.6.5 给水泵

给水泵的传动方式有电动机传动、专用小汽轮机传动和汽轮发电机主轴传动等三种。

船舶汽轮发电机组给水泵大多由专用的汽轮机传动,它既能采取变速方式调节给水泵流量,又能提高机组的热经济性,具有独特的优点。

给水泵采用专用的凝汽式小汽轮机传动,蒸汽汽源可以来自主机的抽汽,其排汽则进入单独的小凝汽器。采用这种变速汽轮机的传动方式,可以不受水泵耗功的限制,用调节转速的方法来改变给水量。同时还由于汽源来自主机抽汽,降低了主机的排汽损失,从而提高了主机和整个机组的热经济性。因此,在超高参数的大容量机组中,大多采用这种传动方式。

3.7 凝汽冷却装置

为了降低汽轮机的排汽压力,提高汽轮机的热效率,最有效的方法是将汽轮机的排汽进行凝结,使汽轮机的排汽压力降低到比较高的真空度。同时将汽轮机排汽凝结成的凝结水,作为锅炉的给水重新送回到锅炉中去重复使用。

凝汽冷却装置包括凝汽器、抽气器、循环水泵等设备。

3.7.1 凝汽设备

凝汽器的主要功能是使汽轮机的排汽端建立并维持一定的真空度,使进入汽轮机工作的蒸汽能膨胀到尽可能低的压力,从而增加可以利用的焓降,以提高汽轮机的效率。

但是,汽轮机的排汽压力并不是在任何场合下任意降低都是有利的。因为过份地降低排汽压力,需要增多凝汽器的冷却面积,增加循环冷却水量和耗用电量,因而增加整套辅机设备的基建投资和运行费用。因此,合理地选择凝汽设备,对于发电厂的经济效益影响较大。

凝汽器的种类较多,现代大型机组一般都采用表面式凝汽器。表面式凝汽器大都采用水作为冷却介质,也可以采用空气作为冷却介质。

凝汽器的结构设计,应力求使凝汽器的传热系数高、汽阻小,喉部有良好的空气动力特性,凝结水的过冷度低,除氧效果及真空严密性好,不应有集积空气的死区等。

中间再热机组在起动或甩负荷时,往往将锅炉的出口蒸汽经旁路引入凝汽器以回收凝结水。为了使这一部分旁路蒸汽的参数降低到凝汽器及后汽缸所允许的参数值,在凝汽器的喉部应装有减温减压器。

(1) 真空度的选定。凝汽器的真空度选择必需经过一系列热力计算和技术经济比较以后,才能选定合适的真空度。一般有所谓最大真空度和最佳真空度之分。

不论是对于新设计制造的机组,还是对于已投入运行的

汽轮机都有一个最大真空度作为限制。它既受汽轮机末级特性和低压汽缸在制造工艺上的影响,又受抽汽设备性能上的限制,不可能无限制地提高真空度。此外,过高的真空度也将使汽轮机组的轴向推力增大,对机组的安全运行也有影响。因此从凝汽器等设备的工作能力来说,也即有一个最大真空度。

在进入凝汽器的蒸汽流量以及冷却水的进口温度不变的情况下,可以采取改变进入凝汽器的冷却水量的办法来改变真空度,也就是可以采用提高冷却倍率来提高真空度。当汽轮机的微增出力与循环水泵增加的耗电之间的差值为最大时的真空度,称之为最经济的或最佳真空度。最佳真空度通常是在运行中通过试验来确定。根据试验数据画出如图 3.2-16 所示微增出力与冷却水量的关系曲线,即可得出最佳真空度值。

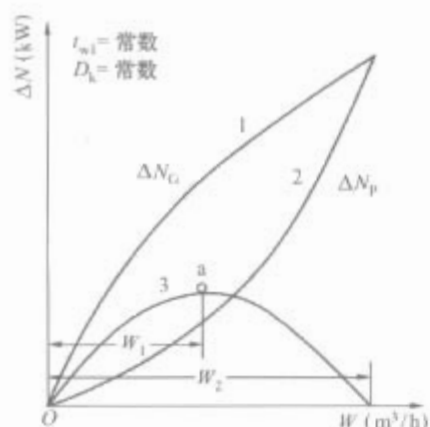


图 3.2-16 出力与冷却水量的关系曲线

以供给到凝汽器去的最小冷却水量为起点,当逐渐增加冷却水量时(这时进入凝汽器的蒸汽量 D_k 不变,冷却水的进口温度 t_{w1} 不变),汽轮机的微增出力 ΔN_G 及循环水泵消耗的电量 ΔN_P 都随之增加。再将汽轮机的微增出力和循环水泵所耗的电量之间的差值绘出与冷却水量有关的曲线,即可得出相当于最大的赢得出力的冷却水量值。该冷却水量值时的真空度即为最佳真空度(图中曲线 3 上的 a 点)。当冷却水量再增加时, ΔN_G 和 ΔN_P 两者之间的差值减小。这是因为虽能提高汽轮机的微增出力,但它逐渐被循环水泵所消耗的电力所抵偿,因此是不经济的。

(2) 冷却水量的确定。汽轮机的排汽在凝汽器中放出的热量被冷却水吸收,根据下列公式即可求出凝汽器所需要的冷却水量 W [水的比热容为 $4.1868 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]

$$W = \frac{D_k (i_k - i'_k)}{t_{w2} - t_{w1}} \quad (3.2-24)$$

式中: D_k 为进入凝汽器的蒸汽量, kg/h ; i_k 为汽轮机排汽焓, kJ/kg ; i'_k 为背压为 p_k 时的饱和水焓, kJ/kg ; t_{w2} 为凝汽器出口的冷却水温, $^\circ\text{C}$; t_{w1} 为凝汽器进口的冷却水温, $^\circ\text{C}$ 。

上式中 $(i_k - i'_k)$ 为每千克蒸汽在凝汽器内放出的热量,其值一般为 $2177 \sim 2240 \text{ kJ/kg}$, $(t_{w2} - t_{w1})$ 为每千克冷却水在凝汽器内的温升,其值一般为 $8 \sim 10 ^\circ\text{C}$ 。

上式也可以写成如下型式,即

$$m = \frac{W}{D_k} = \frac{i_k - i'_k}{t_{w2} - t_{w1}} \quad (3.2-25)$$

m 称为冷却倍率,即每冷却 1 kg 排汽所需要的冷却水量。 m 的数值一般为 $50 \sim 80$,其具体数值需要通过技术经济比较确定。

3.7.2 冷却水系统

冷却水系统主要是保证供给凝汽器的冷却水,同时还供

给一部分给其他辅助机械设备的冷却用水。

(1) 系统选择。在选择供水系统以前,首先应该计算机组在额定负荷的情况下运行时全部凝汽器所需要的冷却水量。

凝汽器的冷却水量应该根据历年的月平均水温,按最佳的冷却倍率确定。同时还要验算在冷却水温为最高计算温度时,汽轮机能够满负荷运行。

供给凝汽器的冷却水有直流供水和再循环供水两种基本方式。

直流供水系统是从水源处取水,利用水泵和管渠将水输入凝汽器,经热交换后即排回水体,不再返回使用。当水源充足时,采用直流供水系统通常是经济的。这时,进入凝汽器的冷却水温度完全由自然条件所决定,它随季节的气候而变化,一般都能维持较好的真空度。

再循环供水系统是利用水泵和管沟将冷却水输入凝汽器,经热交换后的热水进入冷却设施进行冷却,使其水温降至允许值,然后又重复输入凝汽器而循环使用。当水资源不足或采用直流供水不经济时,均采用再循环供水系统。

(2) 循环水泵。循环水泵一般采用大流量、低扬程的轴流泵或离心泵。大容量的机组大都采用轴流泵,有时还由于条件限制,需要采用立式循环水泵,由感应电动机直接传动。

水泵的总出力应能满足冷却水的最大计算用水量,一般不设备用台数。当其中一台水泵停止运行时,其余水泵应能保证供给不少于 75% 的最大计算用水量。当采用海水作为冷却水源时,循环水泵应有一台运行备用。

当水泵装设于汽轮机房或采用单元制供水系统时,通常每台机组配置两台水泵,其总出力应等于该机组的最大计算用水量。为了运行调度灵活,也可在相邻两台机组的凝汽器进水管之间装设联络管。在条件合适时,采用动叶可调水泵或每台机组配置三台水泵,可使运行安全经济。

3.8 结构设计

3.8.1 轴承

(1) 在舰船规定的倾斜和摇摆状态下,轴承应能得到连续有效的润滑,应具有防止滑油从轴承漏出和防止蒸汽进入轴承的措施。

(2) 轴承应设有符合规定的温度传感器,用以测量轴承温度。在正常运行时,轴承合金的温度一般应不超过 $90 ^\circ\text{C}$ 。

(3) 止推轴承可与该端的径向轴承设置在同一轴承座内。

(4) 轴承的结构应设计成便于拆装。结合面上的紧固螺栓应有防松措施。径向轴承的结构应能在不卸除转子的条件下取出下部轴瓦。

(5) 自润滑式滑动轴承在舰船规定的倾斜状态下,油环和油盘应能自由旋转,不与储油槽的端面或侧面相擦或相碰,油环的运动应无明显的不规则性,并在结构上考虑在舰船倾斜、摇摆或受到冲击时防止油环离位的措施,并应设有油位指示器或测量杆。

(6) 对于强制润滑的滑动轴承、发电机、汽轮机及其他有关装置,所需润滑油应由发电机组滑油系统统一供油,并设有液流观察器和节流阀。

(7) 非全封闭滚动轴承应设置加油杯(孔)和排油道。当设有放油塞时,放油塞应设在易于接近的部位。

(8) 发电机可以为双轴承结构,也可以为单轴承结构。

(9) 在减速齿轮箱中、支撑小齿轮和大齿轮各轴颈的轴承一般应为同规格和同型号的轴承。设计相同的左、右舷齿轮箱的轴承应能互换。

(10) 质量在 15kg 以上的每半块轴瓦应有一个或几个吊环螺栓。为了便于拆卸,每半块轴瓦上设有供提携或夹持的装置。

3.8.2 联轴器

(1) 汽轮发电机组一般应选用弹性联轴器。当发电机采用单轴承结构时,应采用锻造在发电机转子上的法兰盘进行对接,法兰盘的尺寸和结构应适宜于用螺栓连接到与之相配的驱动法兰盘上。

(2) 弹性联轴器的设计应能在停机条件下方便地拆卸。

3.8.3 底座

(1) 底座的强度和刚度应能承受下列载荷:

1) 设备的质量(包括工作时液体的质量、所连接的管子和电缆无支撑长度一半的质量),再加上舰船运动和振动的动力效应。

2) 由设备本身的运转及连接系统产生的载荷。

(2) 底座应比例相称,使应力分布均匀合理,从而通过弹性变形最大限度地吸收能量。应避免因凹角或其他因素引起应力集中。

(3) 底座上不应有可滞留液体的凹坑,结构的凸角边缘应适当倒圆或平整,以免伤害人员。

(4) 底座的设计应确保在任何工作条件下,均能防止由于热膨胀而引起的不对中或过量变形。

(5) 在垂直冲击力下,螺栓应尽量处于拉应力状态而不应处在切应力状态。螺栓孔的公差应符合有关规定。

3.8.4 温度传感器

(1) 应在汽轮机、减速齿轮和发电机轴承、发电机定子绕组以及发电机水——空气冷却器的进出风端等部位设置温度传感器。

(2) 测量轴承温度的温度传感器应埋入轴承的巴氏合金中。每个径向轴承和止推轴承均应设置一只温度传感器,径向轴承的温度传感器应埋在瓦块热点处,止推轴承的温度传感器应埋在止推瓦块的热点处。

(3) 发电机每相定子绕组应至少设有两只埋入式温度传感器,其中一只作为备用。温度传感器应埋在各相绕组预计的温度最高处。

(4) 在空气冷却器进、出风端设置的传感器应做到无需拆卸冷却器外壳组件,就能方便地实施更换。

3.8.5 机旁控制箱(板)

(1) 机旁控制箱(板)上至少应设置下列仪表:

- 1) 转速表。
- 2) 汽轮机各主要部位的蒸汽参数测量仪表。
- 3) 滑油压力表。
- 4) 滑油温度表。

(2) 机旁控制箱(板)上应设有显示保护装置动作的指示灯。表示超速或滑油压力过低的指示灯应为红色指示灯。

(3) 机旁控制箱(板)上应设有一只控制部位转换开关。

3.8.6 汽轮机

3.8.6.1 汽轮机转子结构要求

(1) 在汽轮机叶片工作部分到叶根部分过渡处,叶轮轮毂以及在轮体和轮毂的过渡处均应有过渡圆角,键槽和平衡

孔的边缘应修圆。

(2) 叶轮的锁口、平衡孔和键槽三者中的任何两者都不应位于同一半径的径向位置上。叶轮套装在转子上时,任意相邻叶轮的键槽所成的夹角应不小于 90°。

(3) 汽轮机在所有运行工况下,运动部件与固定部件及轴封部分均有一定的径向与轴向间隙。

(4) 设有倒车级的汽轮机,其叶片应具有能承受倒顺车时蒸汽逆向冲击的足够强度。

(5) 调整与校验:

1) 主汽轮机的整锻转子或焊接转子,如进汽温度超过 400℃,则应在热处理和粗加工后进行热稳定试验。

2) 同型号的首台汽轮机应进行叶片组振动调整,使在主要工况下避开共振,并保证在任何工况下安全运行。

3) 转子装配完工后应与联轴器一起作动平衡试验。

3.8.6.2 汽轮机静子结构要求

(1) 汽缸及汽缸内的隔板,喷嘴箱等应有轴向或径向自由膨胀的可能。

(2) 装设在汽缸内的倒车内汽缸或其喷嘴箱应有相对于外面汽缸的轴向或径向自由膨胀的可能;倒车进汽管与汽缸不应采用刚性连接。

(3) 同型号的首台汽轮机,其全部隔板应作最大负荷试验,以校验其挠度变化。

(4) 汽轮机的外汽封如采用碳精环,应不打开汽缸即可修换。

(5) 汽轮机的汽缸应有放泄设备。

3.8.6.3 轴承结构要求

(1) 汽轮机的支持轴承和推力轴承均采用滑动轴承。

(2) 高压主汽轮机及冷态迅速启动的汽轮机,其支持轴承和推力轴承建议采用自位式结构,推力轴承也可采用能均匀分布推力的垫块结构型式。

(3) 轴承座集油腔的结构,应保证滑油系统在舰船处于倾斜状态下可靠地工作。轴承滑油温度应不高于 70℃。

(4) 若汽缸和轴承座不是做成一体的,则其结合处应能保证汽缸与轴承座对中后的定位,并允许在任何方向出现热膨胀。

3.8.7 调速器

(1) 并联运行汽轮发电机组的调速器应具有能改变稳态调速率的可调机构。

(2) 转速变换器应为既能用手轮进行手动操作,又能在控制站进行电气控制,其调整范围应满足订货合同或汽轮发电机组单篇规范的要求。在遥控操作时,转速变换器应能在 60s 内,以规定的调速率使转速在空负荷转速至满负荷转速的范围内调节。

(3) 速关主汽阀应为液压继动式,靠油压开启,并保持打开状态,其支撑应具有抗冲击能力。该阀应设计成能被超速自动脱扣装置或手动脱扣装置或高背压脱扣装置作用而关闭。该阀关闭后,应手动复位。

(4) 超速自动脱扣装置应独立于转速调节系统。在规定的冲击条件下应能正常工作,并不应产生误动作。

(5) 手动脱扣装置应能在任何转速下进行操作。该装置应布置在操作人员易于操作的部位,并应有防止误触动的措施。

3.8.8 齿轮箱

(1) 齿轮箱体。

1) 齿轮箱体应有足够的刚度,并应设计成在规定工况下能够承受所有应力。

2) 在齿轮箱的适当部位应设置检查孔,以便检查各齿轮的整个啮合和滑油喷射情况。

3) 齿轮箱应设置一个通气管接头,该接头可供齿轮箱上的一个或多个通气口使用。

4) 为便于拆卸,法兰盘上应设有用以固定起吊螺栓的孔。每个质量大于 16kg 的或拆卸罩盖、挡板或轴承盖均应设有起吊设施。

5) 当舰船倾斜 15°,以致滑油箱里的油可能与齿轮接触时,应采取措施防止由于滑油过分搅动而渗气。

(2) 小齿轮、大齿轮和轴。

1) 齿轮箱的齿轮、轴一般应采用合金钢整体锻造。

2) 齿轮应具有良好的抗点蚀、抗弯曲及抗胶合的能力。

3) 对整体调质的钢齿轮,一般在减速比大于 2 时,应使配对的大小齿轮有一定的硬度差。

4) 表面硬化的齿轮,其硬化层应均匀分布,并延伸至整个齿面和圆角部位。精加工后,齿面应有一定的硬度和硬化层厚度。

5) 齿轮的制造精度应不低于 5 级,对特殊要求的齿轮应不低于 4 级。

6) 齿轮齿面应均匀接触。

7) 齿轮齿合表面与齿根部分应形成无棱边的光滑表面,齿根应有圆角。

8) 齿轮在跑合前应无机械损伤和其他缺陷,以不致影响其制造精度和接触精度。

9) 当齿轮线速度大于 20m/s 时,应作动平衡试验。配平应在齿轮精加工之后进行,并应以切除金属的方法进行配平。图上应标出允许的剩余不平衡值。

10) 装配好的齿轮组应在零件的适当部位上打上装配标记。

3.8.9 冷凝器

(1) 冷凝器在舰船规定的倾斜和摇摆状态下应能正常工作,各有关设备的排汽口或抽汽口不致被淹没。

(2) 水面舰船冷凝器的入口海水温度设计值为 22~24℃;潜艇冷凝器的入口海水温度设计值为 18~19℃。

(3) 冷凝器的冷却面积应有一定的设计裕量,其中包括不少于 3%~5%的堵管裕量。

(4) 冷凝器应采用单流程或双流程、直管表面回热式或直管表面式,冷却水在管内流过。潜艇冷凝器的管板应设计为双管板结构。

(5) 冷凝器海水侧应设有安全阀,潜艇冷凝器的安全阀宜装在进口水室附近的冷却水管道上。安全阀应按有关技术条件的规定进行整定。

(6) 冷凝器应设有防蚀锌块或采取其他有效的防腐蚀措施,以防海水对冷凝器的腐蚀。

(7) 潜艇冷凝器的结构应具有承受设计压力、温度及外加载荷的周期性变化的能力,并能承受规定的疲劳次数和满足关联温度变化及其他规定瞬变条件的要求。

(8) 在冷凝器的蒸汽侧和海水侧应设有泄放口。

(9) 在冷凝器热井的适当部位应设置水位指示器,其设置位置应便于观察。

3.8.10 抽气器

(1) 每台冷凝器应至少设置一台抽气器。抽气器的抽汽能力应保证冷凝器的真空度在任何工况下均满足使用要求。

(2) 当冷凝器内的真空度要求较高时,抽气器可设计成两级结构。

(3) 抽气器的喷嘴直径及喷嘴至扩散器喉部之间的距离

应能在试验时进行调整,已获得最佳的工作效率。

(4) 抽气器应采用凝水冷却,已回收热能。

(5) 抽气器的凝水回收管路上应设有阻汽器或其他阻汽设施。采用阻汽器时应设带截止阀的旁通管路。

(6) 抽气器向舱内排汽时,其排汽温度应尽量低。

(7) 抽气器应尽可能靠近冷凝器,以使空气吸入管路的长度缩至最短。

(8) 抽气器的安装位置应便于操作和维修,同时还应留出空间,以便于拆卸冷却管和喷射器喷管。

3.8.11 海水冷却器

(1) 发电机组应尽可能采用全封闭型冷却器。

(2) 海水冷却器的通水部分应能承受密性试验和强度试验而不损坏或渗漏。

(3) 应对海水流量和风量进行监视,并应设有电机外壳内冷却水泄漏的报警装置。

(4) 冷却器因故障不能工作时,发电机应能按不低于防滴式的外壳防护型式作应急持续运行。电机的输出功率应为原额定功率或降至经用户审查同意的功率。

3.8.12 滑油泵

(1) 汽轮发电机组应设一台机带油泵,为轴承和控制系统提供强制润滑的滑油。

(2) 额定功率大于或等于 710kW 的汽轮发电机组应设置一台电动滑油泵,以使机组在启动时或机带油泵发生故障而机组惯性旋转时向轴承供应滑油。

(3) 汽轮发电机组应配置一台手动滑油泵,以供电动滑油泵失效时使用。

3.9 稳定性设计

3.9.1 参与并联运行的汽轮发电机组的调速性能要求

(1) 并联运行汽轮发电机组的调速器应具有能改变调速率的可调机构,其可调范围一般的下限值应为 0,其上限值应不小于 5%,以使机组并联运行时将各并机组的调速率调到基本一致。

(2) 转速变换器应为既能用手轮进行手动操作,又能在控制站进行电气控制,其调整范围应满足定货合同或汽轮发电机组单篇规范的要求。在遥控操作时,转速变换器应能在 60s 内,以规定的调速率使转速在空负荷转速至满负荷转速的范围内调节。

(3) 速关主汽阀应为液压继动,靠油压开启,并保持打开状态,其支撑应具有抗冲击能力。该阀应设计成能被超速自动脱扣装置或手动脱扣装置或背压脱扣装置作用而关闭。该阀关闭后,应手动复位。

(4) 超速自动脱扣装置应独立于转速调节系统。在规定的冲击条件下应能正常工作,并不应产生误动作。

(5) 手动脱扣装置应能在任何转速下进行操作。该装置应布置在操作人员易于操作的部位,并应防止误触动的措施。

(6) 机组调速性能应符合表 3.2-9 的规定。

表 3.2-9 机组调速性能

项 目	精度等级	
	I 级	II 级
稳态调速率 δ_{st} (%)	≤ 2	≤ 4
瞬态调速率 δ_d (%)	≤ 4	≤ 6
恢复时间 t (s)	≤ 3	≤ 3
转速波动率允许值 ϕ_1 (%)	≤ 0.5	≤ 0.5

续表

项 目	精度等级	
	I 级	II 级
转速波动率 ψ_2 (%)	≤ 0.15	≤ 0.15
不灵敏度 ϵ (%)	≤ 0.4	≤ 0.4

注 1. I 级适用于对频率有较高要求的场合; II 级适用于一般舰船的汽轮发电机组。

2. 瞬态调速率 δ_d 、稳态调速率 δ_{st} 、恢复时间 t 和转速波动率允许值 ψ_1 是在额定负载至零负载 (和反之) 变动情况下予以要求的; 转速波动率 ψ_2 是在额定转速时, 各种负载工况下予以要求的; 不灵敏度 ϵ 是在同一负载下, 当缓慢增加负载或减小负载时要求的。

(7) 机组调速器遥控伺服机构的调速灵敏度应在每秒 0.5%~1.5% 额定转速范围内, 以适应遥控或自控时调节转速的需要。

3.9.2 参与并联运行的发电机组及其调压性能要求

(1) 发电机组应为连续工作制 (SI)。

(2) 发电机应为三相三线制, 并采用星型 (Y) 连接。

(3) 主配电板上应设有微调发电机空载电压的遥控电压整定电位器。

(4) 励磁方式应为下列两种形式之一:

1) 带自动电压调节器的无刷相复励励磁系统 (简称无刷励磁)。

2) 带自动电压调节器的相复励励磁系统 (简称可控相复励)。

(5) 自动电压调节器在结构上应符合 GJB 515A—1999 《舰船交流发电机电压调节装置规范》的规定。

(6) 汽轮带无功调差装置时, 发电机在规定的稳态调速率和额定功率因数下, 负载在空载到额定之间变化时, 稳态电压调整率的调节范围下限值应为 0, 其上限值应不小于额定电压的 5%。

(7) 发电机励磁系统在空载时应能手动平滑地调整发电机端电压, 其调整范围应不小于额定电压的 95%~105%。

(8) 发电机励磁系统应有限制过电压的措施, 其整定值应在额定电压的 105%~120% 范围内。

(9) 机组在规定的稳态调速率、无功调差装置不起作用及在空载到额定负载之间的任一负载下运行, 当功率因数在 0.5 (滞后)~0.8 (滞后) 范围内变化时, 其稳态电压调整率应不超过 $\pm 1\%$; 当功率因数为 0.9 (滞后) 时, 其稳态电压调整率应不超过 $\pm 2\%$ 。

(10) 机组在空载到额定负载之间的任一三相平衡负载下的电压波动率, 应不超过 $\pm 0.5\%$ 。

(11) 机组在额定转速和接近额定电压的空载状态下, 突加电流为额定电流的 50%、功率因数不超过 0.4 (滞后) 的三相平衡负载时, 在发电机输出端测得的瞬态电压调整率应不超过 13%。电压恢复并保持在最终电压的 $\pm 1\%$ 允许带内所需的时间应不超过 1.0s。

3.9.3 电压波形

(1) 汽轮发电机组空载时输出线电压波形偏离系数应不超过 5%。

(2) 汽轮发电机组从空载到额定负载 (线性), 输出线电压波形的正弦畸变率应不大于 1%, 各单次谐波含量应不大于 2%。

3.9.4 短路

汽轮发电机组在自励情况下, 应能受出线端三相和任意

两相间突然短路而不受任何损坏。短路经历的时间应不小于由式 3.2-26 得出的计算值

$$I^2 \cdot t = 180 \quad (3.2-26)$$

式中: I 为短路电流持续值, 标么值; t 为短路经历的时间, s。

在三相突然短路期间, 短路电流的持续值应不小于 3.2 倍的额定电流。短路故障切除后应能恢复正常运行。

3.9.5 不对称负载

汽轮发电机组在额定转速和空载下运行, 在任意两相间接入一个电流为额定电流的 15%、功率因数为 1~0.8 (滞后) 之间的负载, 此时线电压的最大值或最小值与三相线电压的平均值之差应不超过此平均值的 $\pm 3\%$ 。

3.9.6 并联运行

(1) 机组并联运行时, 当负载在总额定功率的、功率因数在 0.5 (滞后)~0.9 (滞后) 的范围内变化时, 机组应能长期稳定并联运行。每台机组的有功功率和无功功率分配差度均不应超过 10%。

(2) 并联运行机组在 20%~50% 额定负载工况下, 起动容量约为最大发电机单机容量 15% 的四极笼型异步电动机时, 其动态过程应能稳定, 并最终达到规定的有功功率和无功功率分配差度要求。

(3) 应采取措施消除并联运行时可能发生的功率交互振荡, 或将其降低至规定限值。

(4) 若有要求汽轮发电机组应能与柴油发电机组或燃气轮机发电机组长期稳定并列运行。

3.10 安全性设计

3.10.1 超速保护装置

(1) 主辅汽轮机均应设有能自动切断蒸汽的超速保护装置, 当汽轮机转速超过额定转速的 115% 时应自动切断进汽。

若两台或多台汽轮机与同一齿轮箱连接, 则所有汽轮机可仅设 1 个超速保护装置。

(2) 操纵台和汽轮机本体上应设有切断主汽轮机蒸汽的适当的手动脱扣装置。辅汽轮机的手动脱扣装置应设在汽轮机超速保护装置的近旁 (手动脱扣装置系指与执行动作方式无关, 即不管是由机械方式还是借助外部动力的方式, 均由手动操作的任何装置)。

3.10.2 滑油低压保护

(1) 主、辅汽轮机均应设置滑油低压保护装置, 当滑油压力低于规定值时能自动切断进汽。

(2) 主汽轮机应设置有效的应急滑油供应系统, 当滑油压力低于规定值时能自动投入使用。并应设有停机后冷却轴承的适当装置。对于应急供油系统, 应符合《钢质海船入级与建造规范》第 3 篇第 4 章第 6 节的规定。

3.10.3 调速器

(1) 驱动发电机的辅汽轮机和电力推进、可调螺距螺旋桨及设有离合器的主汽轮机, 应装设性能可靠的调速器。

(2) 电力推进、可调螺距螺旋桨以及设有离合器的主汽轮机的调速器应能在各种工况下控制转速, 并在突然卸去满负荷时不使自动超速保护装置动作。

(3) 驱动发电机的辅汽轮机调速器, 除其性能应符合《钢质海船入级与建造规范》第 4 篇第 4 章第 1 节有关规定外, 还应满足下列要求:

1) 当突然卸去额定负荷时, 其瞬时调速率不大于额定转速的 10%, 稳定调速率不大于额定转速的 5%。

2) 当在空负荷状态下突然加上 50% 额定负荷, 稳定后再加上余下的 50% 负荷时, 其瞬时调速率不大于额定转速的 10%; 稳定调速率不大于额定转速的 5%; 稳定时间 (即转速恢复到波动率为 $\pm 1\%$ 范围的时间) 不超过 5s。

3.10.4 轴向位移保护

主汽轮机应设有当转子轴向位移超过规定值时能自动切断蒸汽的保护装置。

3.10.5 汽封及凝水系统

汽封系统中的管系应布置成能自动排除凝水, 且能防止凝水流入汽轮机。在空气抽除器再循环系统中, 通冷凝器的管路应设置成使水不能冲击转子或汽缸。

3.10.6 操作安全装置

(1) 汽轮机的抽汽连接管上应装设止回阀, 以防止抽气系统内的蒸汽倒流入汽轮机。

(2) 汽轮机应设有动力转车设备, 汽轮机与其转车设备之间应有联锁装置, 在转车设备脱开前不能启动。

(3) 汽轮机的正倒车操纵阀应装设联锁机构。正车阀和倒车阀之间应设有截止阀。

(4) 靠近汽轮机正车和倒车高压涡轮进口处或在操纵阀进口处应设置有效的蒸汽过滤器。

3.10.7 报警信号

(1) 汽轮机应设有当冷凝器内真空度低于规定值时能自动发出声光的报警信号。

(2) 汽轮机的排汽腔或管道应装设超压信号阀, 在背压下工作的汽轮机应装设安全阀。

3.11 自动化设计

3.11.1 机旁控制箱

(1) 机旁控制箱上至少应设置下列仪表:

- 1) 转速表。
- 2) 汽轮机各主要部位的蒸汽参数测试仪表。
- 3) 滑油压力表。
- 4) 滑油温度表。

(2) 机旁控制箱上应设有显示保护装置动作的指示灯。表示超速或滑油压力过低的指示灯应为红色指示灯。

(3) 机旁控制箱上应设有一只控制部位转换开关。

3.11.2 控制系统

(1) 汽轮发电机组的控制系统除应符合本章规定外, 还应符合 GJB 4000—2000《舰船通用规范》的有关规定。

(2) 汽轮发电机组除能在机旁手动控制外, 还应能遥控。为此, 应设有必要的执行机构、测量参数用的传感器以及信号和报警装置。

(3) 汽轮发电机组至少应具有下列控制功能:

- 1) 电压和无功功率的调节。
- 2) 频率和有功功率的调节。
- 3) 机组启动。
- 4) 机组停机。
- 5) 并联运行。

(4) 具有自动控制功能的汽轮发电机组, 其控制优先顺序应符合下列原则:

1) 手动控制优先于半自动控制, 半自动控制优先于自动控制。

2) 机旁控制优先于主配电板控制, 主配电板控制优先

于集中控制台控制。

(5) 汽轮发电机组至少应设有能对下列故障实施报警的报警装置:

- 1) 超速。
- 2) 滑油进机压力低。
- 3) 滑油温度高。
- 4) 发电机定子绕组温度高。
- 5) 发电机冷却空气或冷却水温度高。
- 6) 冷凝器真空度低。
- 7) 转子轴向位移大。
- 8) 排气压力高。
- 9) 发电机空气——海水冷却器漏水。

(6) 汽轮发电机组至少应设有具有下列功能的安全保护装置:

- 1) 超速, 自动停机。
- 2) 滑油进机压力低, 自动停机。
- 3) 转子轴向位移过大, 自动停机。
- 4) 排气压力过高, 设置具有高背压自动脱扣功能的高背压脱扣装置及排汽端汽缸安全阀。
- 5) 速关主汽阀的手动脱扣装置。

(7) 根据要求还可附加其他功能, 例如冷却水预热、预润滑、多路故障处理、启动输出改变 (电启动、气启动) 等。

3.12 参数设定与调整

3.12.1 启动试验

机组应进行正常启动和冷态应急启动试验。冷态应急启动所需的时间应满足 (从打开主气阀至带额定负载的时间一般应不超过 2min, 发电机的额定功率大于 1000kW 时, 一般不应超过 5min) 的要求。

3.12.2 稳态调速率可调范围检查

机组在规定的蒸汽参数条件下以额定转速运转。将调速器稳态调速率旋钮置于最小位置, 机组负载逐步增加到额定有功负载, 再逐步卸去全部负载, 记录此时机组的空载转速或频率。将调速器稳态调速率旋钮置于最大位置, 重复上述试验。分别求出稳态调速率的最小值和最大值。

3.12.3 稳态调速率测定

(1) 试验应在试验工况 F^{\bullet} 下进行。

(2) 机组先以空载方式运行, 发电机的励磁在自动电压调节器的控制下, 将机组的转速调至 102% 额定转速后, 固定调速机构。从空载到 100% 额定负载, 再从 100% 额定负载到空载单方向缓慢地调节机组负载 (不允许在某一负载点来回调整), 在加载和减载方向应安排不少于五个间隔大致相等的点, 测量负载改变后的稳态转速或频率、机组功率及阀的升程。试验应至少连续进行三次, 每次得到的转速特性曲线 (负载——转速特性) 应基本重合。求取稳态调速率和不灵敏度。

3.12.4 转速波动率测定

(1) 试验应在试验工况 F 下进行。

(2) 机组额定转速下运行, 用示波器 (配瞬时转速测量仪) 或其他类似的记录器分别记录空载, 20%、50%、75% 和 100% 额定负载时的转速变化。示波器的拍摄速度应不小于 100mm/s。在每一负载状态下, 机组应稳定运行 5~10min, 记录时间应不短于 10s。

● 试验工况 F : 机组在规定转速、规定负载和按下列规定的蒸汽参数变化范围内运行: 进口蒸汽压力应在额定进口蒸汽压力的 $\pm 3\%$ 范围内; 进口蒸汽温度应在额定进口蒸汽温度 $\pm 17^{\circ}\text{C}$ 的范围内; 排出压力应在额定排出压力 $\pm 3.5\text{kPa}$ 。

3.12.5 瞬态调速及其恢复时间测定

(1) 试验应在试验工况 F 下进行。

(2) 发电机在自动电压调节器的控制下, 机组在额定转速、额定电压和额定有功负载下运行 5~10min 后, 突卸额定有功负载。用示波器 (配瞬时转速测量仪) 或其他类似的记录器记录转速的变化。该试验应连续做三次 (一次试验稳定后再进行下一次), 试验结果应取三次试验的平均值 (但三次试验的测量数据均需提供)。

3.12.6 电压整定范围检查

(1) 试验应在试验工况 F 下进行。

(2) 发电机处于空载状态, 将机组转速调至额定值, 发电机应自行起励, 发电机的空载电压应稳定在电压调整率范围内。

(3) 调节电压整定装置, 观察电压的变化范围是否符合要求。

3.12.7 稳态电压调整率测定

(1) 试验应在试验工况 F 下进行。

(2) 在无功补偿装置不起作用的情况下, 使发电机在额定转速、额定电压、额定有功负载和额定功率因数下运行, 在不改变汽轮机调速机构和电压调节器的情况下, 使负载从空载到 100% 额定负载, 再从 100% 额定负载到空载变化方式为单方向缓慢或急剧地变化, 负载的功率因数应始终保持在规定值。在各单程变化范围内, 应至少安排间隔大致相等的五个测试点, 其中应包括 20% 额定负载点, 记录各点的负载、电流、电压和频率值。

(3) 在功率因数分别为 0.5 (滞后) 和 0.9 (滞后) 的情况下重复上述试验。当功率因数为 0.5 (滞后) 时, 负载以电流计算; 当功率因数为 0.9 (滞后) 时, 负载以有功功率计算。

3.12.8 电压波动率测定

在功率因数分别为 0.5、0.8 和 0.9 (滞后) 的情况下, 使机组在 20%、50%、75% 和 100% 额定负载下运行, 用示波器或其他类似仪器记录电压波动情况。记录速度应不低于 25mm/s, 该项目在质量一致性检验时可用电压表测量。

3.12.9 瞬态电压调整率及其恢复时间测定

(1) 试验应在试验工况 F 下进行。

(2) 机组在额定转速、额定电压和空载状态下运行, 突加功率因数不超过 0.4 (滞后)、输入电流为 50% 发电机额定电流的三相对称负载。用示波器拍摄在突加负载过程中发电机一相电流和三相电压的波形, 同时记录突加前后发电机电端电压、相电流的稳态值和功率因数。示波器的拍摄速度应不小于 100mm/s, 稳定电压的迹线幅值不小于 25mm, 拍摄长度不短于 300mm, 选取合闸相角小于 15° (电角度) 的电压波形。

4 燃气轮机发电机组

4.1 基本原理

燃气轮机是一种旋转式内燃动力机械, 通常由压气机、燃烧室和透平三大部件组成。透平发出的约 2/3 功率用于拖动压气机, 其余功率则通过转轴输出带动外负荷, 其工作原理如图 3.2-17。

燃气轮机发电的生产流程如下: 大气中的空气被吸入到压气机中压缩到某一压力 (一般不低于 0.3MPa), 由于空气被压缩, 它的温度相应地升高到 100℃ 以上; 然后被送入

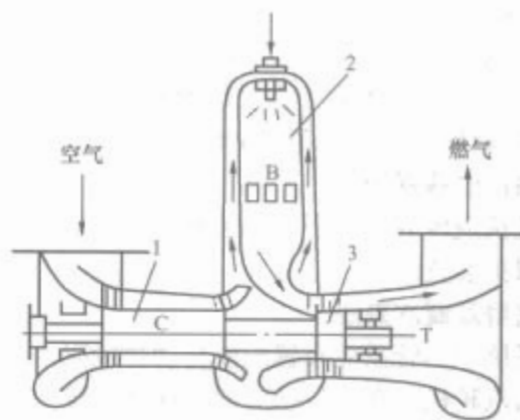


图 3.2-17 开式简单循环燃气轮机工作原理

1—压气机; 2—燃烧室; 3—透平

燃烧室, 与喷入的燃料 (油或天然气) 在一定压力下混合燃烧后产生高温燃气 (温度通常高于 600℃); 再流入燃气轮机中膨胀做功, 直接带动发电机发电; 最后排入大气。从图上可以看出, 压气机是由燃气轮机直接带动的, 燃气轮机的总功率减去压气机消耗的功率以后才是这台燃气轮机的有效利用功率, 也就是发电机的功率。随着装置效率的不同, 发电机的功率通常为燃气轮机功率的 1/3~1/4。

由于技术和经济性等原因, 目前除少量舰艇外, 还很少有船舶采用燃气轮机发电机组。

4.1.1 理想热力循环

在理想的热力循环中, 是假定工质在工作过程中既没有摩擦损失, 也没有外界的热交换和泄漏等损失。

图 3.2-18 是这种理想热力循环的压力—比容 ($p-V$) 和温—熵 ($T-S$) 图。图中点 1 是工质进入压气机的状态; 曲线 1-2 是工质在压气机中的绝热 (等熵) 压缩过程; 点 2 是压气机出口的工质状态 (压力达到最高点); 曲线 2-3 是工质在燃烧室中的等压加热过程; 点 3 是工质在燃烧室出口的状态 (温度最高); 曲线 3-4 是工质在燃气轮机中绝热 (等熵) 膨胀到大气压的过程; 点 4 是燃气轮机出口的工质状态; 曲线 4-1 是燃气轮机的废气排入大气的等压放热过程。

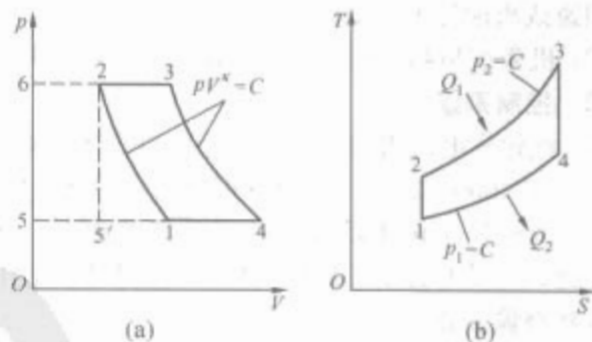


图 3.2-18 燃气轮机的理想热力循环图

(a) 压力—比容图; (b) 温—熵图

理想气体的绝热工作过程, 一般是以 $pV^\kappa = C$ (常数) 为特征的, 其循环效率 η_0 可由下式计算

$$\eta_0 = 1 - \frac{1}{\phi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad (3.2-27)$$

式中: ϕ 为压缩比, 即 p_2/p_1 ; κ 为工质的等熵指数 (空气的 $\kappa=1.40$, 一般燃气的 $\kappa=1.33$)。

从上式可以看出, 理想循环的效率主要与压缩比有关, 压比愈大, 效率愈高。图 3.2-19 是循环效率与压缩比的关系曲线。

由于压缩比和温度是密切相关的, 压缩比增大, 压缩终点 2 的温度 T_2 值也就相应增高; 一直可以将温度 T_2 增高

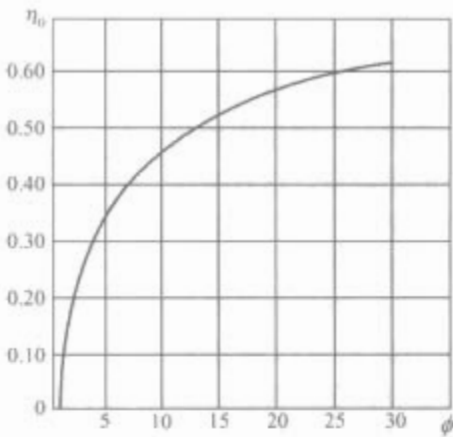


图 3.2-19 燃气轮机理想循环效率与压缩比的关系曲线

到温度 T_3 时，这时压缩比不能再提高，循环效率因此也达到了最高值。因此，工质的最高温度 T_3 值是限制理想循环所能达到最高效率的主要因素。

4.1.2 实际热力循环

在实际的热力循环装置中，由于压气机和燃气轮机都不可避免地有摩擦及泄漏等损失，它们的相等内效率一般只能达到 92% 左右。因此，燃气轮机的实际功率要比在没有损失的理想循环时要小很多。

在理论的热力循环中，发电功率等于理想的燃气轮机（内效率 $\eta_t=100\%$ ）出力 N_t 减去理想的压气机（内效率 $\eta_c=100\%$ ）所消耗的功率 N_c 。即

$$N_t - N_c = N_g \tag{3.2-28}$$

而在实际的热力循环中，燃气轮机的出力为 $N_t \cdot \eta_t$ ，而压气机所消耗的功率却要增加到 N_c / η_c ，因此实际上的发电功率降低为

$$N'_g = N_t \eta_t - \frac{N_c}{\eta_c} \tag{3.2-29}$$

实际热力循环的热效率为

$$\begin{aligned} \eta_h &= \frac{N'_g}{N_g} \left(1 - \frac{1}{\phi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right) = \frac{N_t \eta_t - \frac{N_c}{\eta_c}}{N_t - N_c} \left(1 - \frac{1}{\phi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right) \\ &= \frac{N_t \eta_t \eta_c - N_c}{(N_t - N_c) \eta_c} \left(1 - \frac{1}{\phi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right) \end{aligned} \tag{3.2-30}$$

设功率比 $R = \frac{N_t}{N_c}$ ，则

$$\eta_h = \frac{R \eta_t \eta_c - 1}{(R - 1) \eta_c} \left(1 - \frac{1}{\phi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right) \tag{3.2-31}$$

由上式可以看出，在实际的热力循环中，燃气轮机组的热效率不仅和压缩比 ϕ 有关，而且和功率比 R 有很大关系。由于功率比相当于燃气轮机的进口燃气温度 T_3 与压气机的出口空气温度 T_2 之比，所以燃气轮机组的热效率与燃气初温 T_3 直接有关。

如果压缩比不变，则 T_3 愈高， η_h 也愈高。如果 T_3 不变，则 η_h 随压缩比的增大而升高。当热效率值达到某一最高值后，如果继续增大压缩比，则 η_h 反而下降，这是因为压气机所消耗功率的增长率将迅速超过燃气轮机出力的增长率。相当于热效率最高值时的压缩比一般称之为最佳压缩比 ϕ_{opt} 。

实际燃气轮机的热力特性见图 3.2-20。

4.2 参数和指标

燃气轮机发电机组典型规格参数见表 3.2-10 和表 3.2-11。

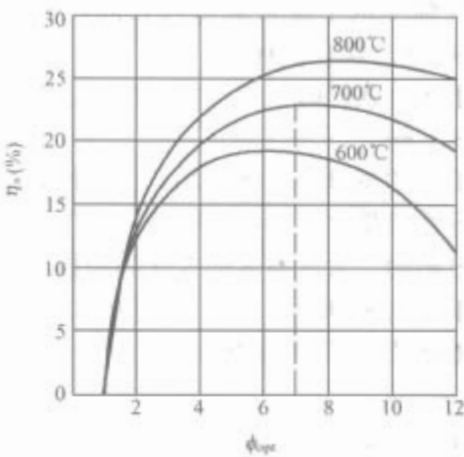


图 3.2-20 实际燃气轮机的热力特性

表 3.2-10 国产燃气轮机技术参数

型 号		MS6001	MS5001	RF900-20
额定功率 (MW)	柴 油	36.6	26.3	20
	天 然 气	37.4		
燃气轮机转速 (r/min)		5100	5100	5100
发电机转速 (r/min)		3000	3000	3000
燃气初温 (℃)		1104	900	900
排气温度 (℃)		543	483	450
空气流量 (kg/s)		136.4	125	116
压气机压比		11.7	10.2	9.6
热耗 [kJ/(kW·h)]		油 11 576	12 451	14 403
		气 11 459	—	—
质量	转子 (t)	10.4	—	—
	定子 (t)	31.1	—	—
	燃气轮机总质量 (t)	91.9	—	—
与发电机组装后机组型号		PG6531B	—	—
总质量 (包括发电机) (t)		—	265	265
生产厂家		南京汽轮机厂		
备 注		与 GE 公司合作生产		

表 3.2-11 国际上几种简单循环新型燃气轮机技术参数

机 型	首台机年份	额定功率 (MW)	进口温度 (℃)	排气温度 (℃)	压缩比	空气流量 (kg/s)	热效率 (%)	制造厂
GT13E2	1993	165.1	1100	524	14.6	532	35.7	ABB
PG9351FA	1996	255.6	1288	609	15.4	624	36.9	GE
V94.3A	1995	265	1300	581	17	659	36	KWU
LM6000	1997	43.43	1243	450	29.4	127	41.3	GE
PW4082 (工业型)	1994	50	1482	—	—	—	43	P&W
701G	1997	334	1427	587	21	737	39.5	MHI

4.3 原动机特性

- (1) 起动快，自动化程度高，可实现无人值班运行。一台 34.5MW 的燃气轮机从冷态起动到带全负荷只需 10min。
- (2) 冷却水耗量少。
- (3) 组装程度高，系统简单，辅助设施量少，建设周期短。25~35MW 级容量燃气轮机，从签合同到建成投产，仅需 8~9 个月时间。

(4) 排气温度水平及含氧量均较高,易于实现热量回收,组成燃气-蒸汽联合循环。

(5) 用于热电联产时,燃气轮机的电、热功率比可高达蒸汽轮机的3.5倍。

(6) 每千瓦的质量小,体积小,机动性好。

(7) 运行性能受大气参数的影响,大气压力的高低对机组功率有明显影响,大气温度的变化则对机组功率和效率都有明显的影响。有些机组,气压每降低10kPa可减少功率10%,气温每降低10℃则可增加功率8%~10%,改善热效率2%~3%。

(8) 单轴燃气轮机变工况运行经济性差。

(9) 与常规火电机组相比对燃料要求较高,但比内燃机要求低,原则上适用于液态及气态燃料。但用固态燃料近来也有所开发。

(10) 需要起动设施。燃气轮机可采用蓄电池组、直流电动机或柴油机作起动动力源,起动功率为主机的2%~5%,起动后还可实现调相运行。

4.4 热力循环设计

燃气轮机发电装置的热力循环方式可以分为开放式、封闭式和联合循环三种,这三种热循环方式的工作原理及其特点如下:

(1) 开放式循环。在开放式循环中,又分有简单循环、回热循环和中间冷却、再热、回热循环三种型式,其工作原理见图3.2-21。

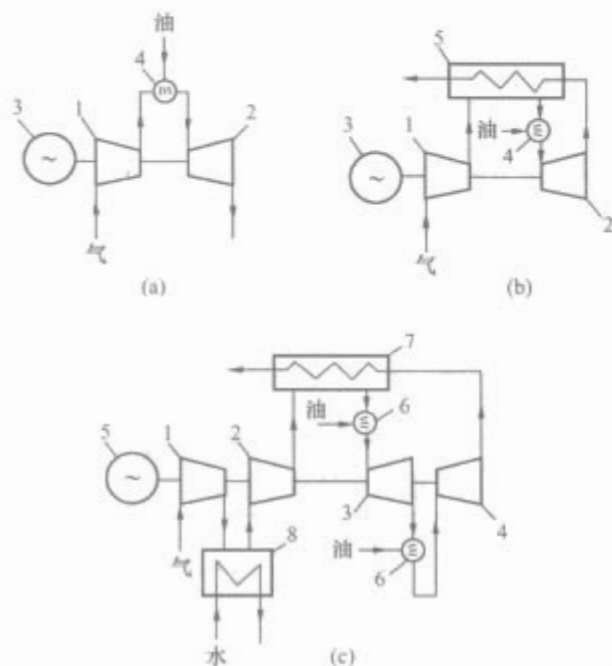


图 3.2-21 开放式循环示意图

(a) 简单循环

1—压气机; 2—燃气轮机; 3—发电机; 4—燃烧室

(b) 回热循环

1—压气机; 2—燃气轮机; 3—发电机;

4—燃烧室; 5—回热器

(c) 中间冷却、再热、回热循环

1—低压压气机; 2—高压压气机; 3—高压燃气轮机;

4—低压燃气轮机; 5—发电机; 6—燃烧室; 7—回热器; 8—中间冷却器

(2) 封闭式循环。这种循环的主要特点是工作介质与大气隔离,工作参数不受大气条件的影响,燃料的种类也不受限制,有可能燃用固体燃料,单机容量可以扩大。但设备比较复杂,一般不适于担任尖峰负荷。其工作原理见图

3.2-22。

(3) 联合循环。这种循环方式是将蒸汽循环和燃气循环进行有机地联合循环,采用一台增压锅炉代替燃气循环中的燃烧室。这台增压锅炉产生的燃气到燃气轮机做功,产生的蒸汽到汽轮机做功。由于燃烧是在高压下进行,燃烧和传热效果都较好,锅炉体积可以缩小到1/5~1/6,大量节省金属材料。其中一种配置方案的工作原理见图3.2-23。

在燃气轮机的热力循环中,基本上采用了下列三种热交换方式:

(1) 回热式。为了充分利用燃

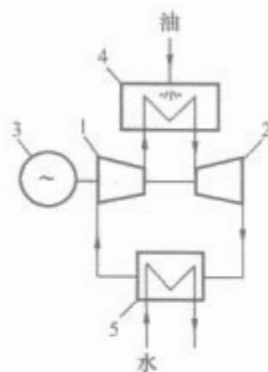


图 3.2-22 封闭式循环示意图

1—压气机; 2—燃气轮机; 3—发电机; 4—热交换器; 5—冷却器

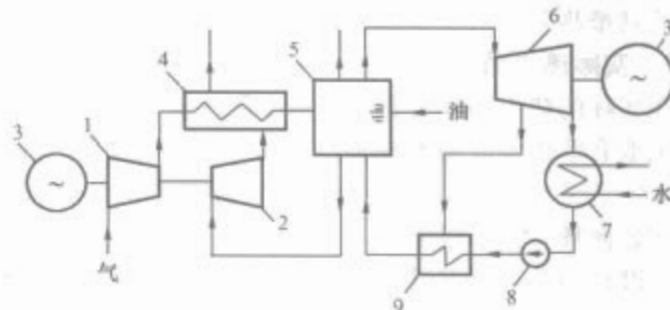


图 3.2-23 联合循环示意图

1—压气机; 2—燃气轮机; 3—发电机;

4—回热器; 5—增压锅炉; 6—汽轮机;

7—凝汽器; 8—水泵; 9—加热器

气轮机排出废气的热量,一般是将燃气轮机的排气引入一台表面式回热器中,利用它的一部分热量传给进入燃烧室以前的压缩空气,以达到节省一部分燃料的目的。带有回热器的燃气轮机发电机组一般要比无回热时节省燃料25%~40%。回热机组的热效率一般为28%~32%。

回热对效率的影响程度取决于回热度 μ 。压缩空气在回热器中实际获得的热量与燃气轮机排出的废气所能放出的最大热量之比称之为回热度。

通常采用下列公式计算回热度

$$\mu = \frac{T_2' - T_2}{T_4 - T_2} \quad (3.2-32)$$

式中: T_2 为进入回热器的压缩空气温度,℃; T_4 为进入回热器的燃气轮机排气温度,℃; T_2' 为压缩空气离开回热器时被加热后的温度,℃。

由于传热损失, T_2' 不可能大于 T_4 , 所以 $\mu < 1$, 通常选取 $\mu = 0.65 \sim 0.85$ 。

(2) 再热式。为了提高机组的功率和效率,燃气轮机发电装置在采用了回热循环方式以后,还可以像大型蒸汽发电厂那样,采用中间加热的方式,提高工质加热的平均温度,增加工质可以利用的热焓降,构成再热式循环。

中间再热的方式是将一台高压燃气轮机的排气引入一台低压燃烧室内重新加热到新的高温,然后进入另一台低压燃气轮机中膨胀做功。这种热循环方式为燃气轮机装置的分缸和分轴制造提供了有利条件。

(3) 中间冷却式。中间冷却的过程是将一台低压压气机出口的空气引入一台表面式中间冷却器中,用冷却水将空气冷却到较低温度后,再进入一台高压压气机内继续压缩。

在分段压缩过程中采用中间冷却的目的是为了减少空气在压缩过程中所消耗的功率,因而相应地提高了燃气轮机的输出功率。

再热循环和中间冷却循环是同回热循环同时采用的。只有这样,才能对机组的热效率 η_h 起到有效的作用。

4.5 成套性设计

4.5.1 一般要求

(1) 涡轮机和压气机等所有部件,应具有与热膨胀要求相一致的配合和间隙。

(2) 涡轮机轴承的布置应使轴承的润滑不受灼热气体的损害。并应采取有效措施防止渗漏的滑油与高温部件相接触。

4.5.2 应力计算

制造厂应提供每个转子,包括叶轮、叶片和转子轴等,在最大设计工况下的应力计算。

4.5.3 振动

燃气轮机在常用转速范围内运转时,涡轮机和压气机的转子、叶轮和叶片不应出现不适当的振动,并提供临界转速计算。如计算中出现临界转速位于常用转速范围内时,中国船级社可要求进行振动试验。

4.5.4 进气和排气系统

(1) 进气管道的设计应能防止有害外来物进入压气机和涡轮机。

(2) 燃气轮机排气系统的布置应防止排出的燃气进入压气机。

4.5.5 燃油和盐分沉积物

(1) 对于使用燃烧后会形成有害沉淀物的非精炼燃油的燃气轮机,应有能定期清除沉淀物的适当设施。

(2) 应设有防止在压气机和涡轮机内积聚盐类沉积物的设施。

4.5.6 转车装置

主燃气轮机装置应设有转车装置,该装置应与起动装置连锁。

4.5.7 起动系统

(1) 起动装置和起动空气管系应符合《钢质海船入级与建造规范》第3篇第9章第5节的有关规定(如适用时)。

(2) 燃气轮机应设有在起动点火之前对燃烧室进行清除的装置,如装有自动起动设施,则在起动顺序中应包括清除程序。

4.5.8 检查孔

建议燃气轮机设检查孔,以便能在不拆卸燃气轮机的情况下用孔探仪或其他仪器检查压气机和涡轮机的转子及燃烧室内部。

4.5.9 指示仪表

(1) 主推进燃气轮机装置应设有必需的监测设备,在控制台上能指示和(或)记录温度、压力、转速等各项主要参数。

(2) 监测设备至少应反映下列内容:

- 1) 压气机的进口空气压力和温度。
- 2) 燃烧室出口处的燃气温度。
- 3) 润滑油压力和温度。
- 4) 转子转速。

4.5.10 安装

(1) 管子和导管与气缸相连接时,不应使燃气轮机产生过大的附加力或力矩。

(2) 燃气轮机的平台格栅和附件支撑处的布置应不妨碍气缸的膨胀。

4.5.11 安全装置

(1) 超速保护装置。

1) 每一燃气轮机都应装设超速保护装置,能在燃烧器附近自动切断燃料以防止发生超速的危险。

2) 主燃气轮机推进装置和驱动发电机的辅燃气轮机装置的超速保护装置应分别在额定转速的110%和115%时动作。

(2) 调速器。

1) 对装有换向装置、可调螺距螺旋桨或电力传动装置的主推进燃气轮机,应装设调速器。调速器应能在突然失去载荷时,控制动力涡轮的转速,而不引起超速保护装置动作。

2) 驱动发电机的辅燃气轮机装置,除装有独立的超速保护装置外,还应装设调速器。调速器应满足下列要求:①当突然卸去满负荷时,瞬时调速率不大于额定转速的10%,稳定调速率不大于额定转速的5%,稳定时间(即转速恢复到波动率为 $\pm 1\%$ 范围内的时间)不超过5s;②并联运行的交流发电机组,稳定调速率应尽量相同。

(3) 滑油低压保护。

燃气轮机应设有滑油低压保护装置,在滑油压力低于允许值时,应能自动切断燃料供给。

(4) 燃气高温保护。

燃气轮机应设有燃气高温保护装置,当燃烧室出口处的燃气温度高于允许值时报警。

(5) 熄火保护。

燃气轮机应设有熄火保护装置,当燃烧室熄火时,应能自动切断燃料供给。

(6) 轴承高温保护。

燃气轮机轴承应设高温保护,当轴承的滑油温度过度升高时报警。

(7) 手动停机装置。

燃气轮机装置的操纵台处,应设有手动停机装置,以备应急情况下迅速切断燃料供应。

(8) 温度控制。

下列燃气轮机装置应设有自动温度控制,以维持主燃气轮机在正常运转范围内的稳定状态:

- 1) 滑油供给。
- 2) 燃油供给或燃油黏度的自动控制。
- 3) 排气。

4.6 特种型式的燃气轮机组合

为了充分利用燃气轮机的许多特点,同时还保留现有其他动力装置的一些优点,目前有两种型式的组合方式。一种是把燃气轮机的旋转式机械的优点和往复式内燃机的高效率优点结合起来,组成自由活塞——燃气轮机联合装置。另一种是最有效地利用燃气轮机排气的热量,用于蒸汽循环中的给水加热等,组成蒸汽——燃气联合装置。这些特种型式的燃气轮机组合装置可以提高热效率,是电力工业中很有发展前途的新型动力装置。

这种联合装置的关键部件是作为燃料发生器的“自由活塞”,这种活塞不是利用曲柄连杆机构而是依靠外侧缓冲气缸中空气垫的作用回弹,因此称之为“自由活塞”,自由活塞本身并不发出有效功率,而是将它所产生的燃气通入燃气轮机内膨胀做功,发出有效功率。

自由活塞燃气轮机的工作原理见图3.2-24。

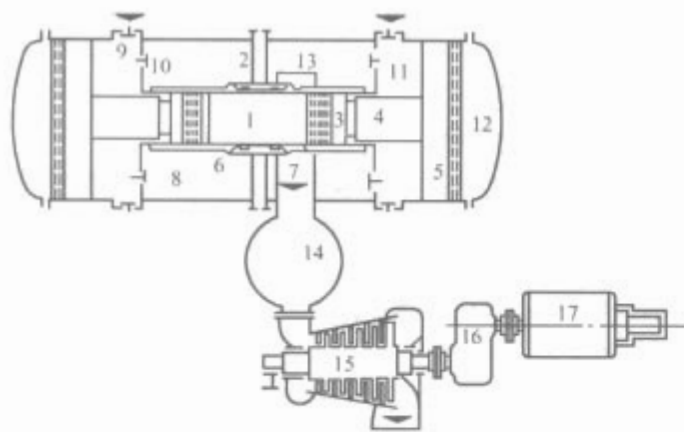


图 3.2-24 自由活塞燃气轮机工作原理图

1—动力气缸；2—喷油嘴；3—动力活塞；4—中段活塞；5—压气活塞；6—扫气口；7—排气口；8—扫气箱；9—进气阀；10—排气阀；11—压气缸；12—气垫缸；13—排气环带；14—燃气包；15—燃汽轮机；16—齿轮减速器；17—发电机

我国研究试制的 ZF340 型自由活塞发气机，其额定功率为 927.5kW (1261 气马力)，产生的燃气温度为 470℃，燃气压力为 0.31MPa。ZF340 型自由活塞发气机与不同功率燃气轮机的组合台数见表 3.2-12。

表 3.2-12 自由活塞燃气轮机配套表

燃气轮机功率 (kW)	ZF340 自由活塞发气机台数
650	1
1500	2
3000	4
6000	8

这种联合装置的热力特性曲线见图 3.2-25。

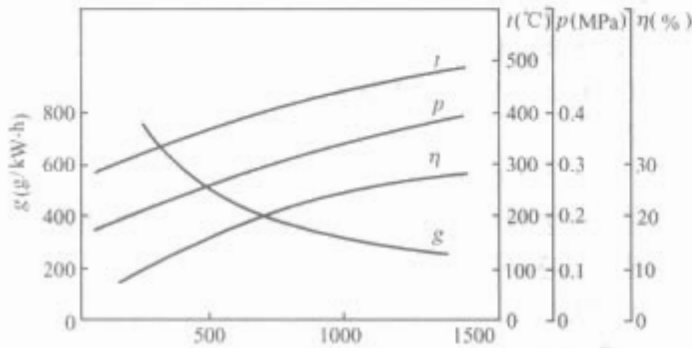


图 3.2-25 联合装置热力特性曲线
 t —燃气轮机进口温度； p —燃气轮机进口压力；
 η —联合装置效率； g —油耗率

自由活塞燃气轮机已在电力工业中得到广泛地利用，例如用作 650~6500kW 的固定电站，650~6000kW 的船舶电站，650~1500kW 的卡车电站，3000~6000kW 的列车电站，一般都具有下列特点：

(1) 运行经济。自由活塞燃气轮机的运行油耗率接近中速增压柴油机，比开放式燃气轮机要低得很多，可以成功地使用廉价的重柴油、燃料油等多种燃料，热效率可达 32%~36%。运行指标的比较见表 3.2-13。

表 3.2-13 运行指标比较表

装置型式	自由活塞燃气轮机	开放式燃气轮机	柴 油 机		
型 号	ZF340	6200kW	12V230	16V240	10L207
油耗[g/(kW·h)]	241	492	255	221	241
热效率(%)	32~36	19	33		38
燃油品种	重柴油、燃料油	重柴油、燃料油	轻柴油		

(2) 制造简便。自由活塞发气机的结构简单，制造工艺中无复杂的曲轴，而且消耗合金钢和有色金属较少，造价比其他动力机组都要低廉。一般中小型通用机械厂都能加工制造。造价指标的比较见表 3.2-14。

表 3.2-14 造价指标比较表

装置型式	自由活塞燃气轮机		燃气轮机	柴 油 机	
型号	ZF340		开放式	12V230	10L207
容量	745kW	6000kW	6200kW	1640kW	1490kW
造 价 (万元)	15	80~90	150	40	40
单位造价 (元/kW)	204	133~150	250	246	272

第3章 船用特种电源

1 概述

船舶电源设备除了常用的交流（工频 50Hz）发电机组和直流发电机组之外，还有许多特殊用电设备，要求设置有不同电压、不同频率的特殊电源设备。

船用特种电源设备大致可分为两类：一类是专给供电电压、供电频率有特殊要求的设备（如雷达、声纳、观通导航、通信等）供电的电源装置，这类电源装置又分为传统的变流机组和电力电子静止电源装置。变流机组主要有直流/交流或交流/直流变流机组、交流/交流变频机组；电力电子静止电源装置主要有：直流静止电源，包括相控整流电源、高频整流电源、DC/DC 开关电源；交流静止电源，包括 DC/AC 逆变电源和 AC/AC 变频电源等。

另一类是特种发电机供电设备，如轴带发电机，还有近二十年才研制推广应用的多相整流型同步发电机、交直流电力集成双绕组发电机以及高速感应式多相整流型发电机等。

2 变流机组

变流机组是利用同轴的两台电机实现交流→直流、直流→交流或者交流→交流的旋转电能变换装置，主要用来产生与供电电源不同电制（不同电压、不同频率）的电源。船用交流电源分为工频（50Hz）交流电源和中频（100～1000Hz）交流电源，从而变流机组可分为工频变流机组（直流变换成 50Hz 交流、或者将 50Hz 交流变换成直流）和中频变流机组（将直流或工频交流变换成中频交流，也称变频机组）。

工频变流机组的主要任务：

（1）在交流为主电网的船舶上，将交流电转换为直流电，向直流负载设备供电和给蓄电池充电；在应急工况下，将蓄电池组的直流电转换为交流电，向船上的重要交流设备供电，保证船舶的安全。

（2）在直流为主电网的船舶上，将直流电转换为交流电，向交流负载设备供电。

中频变流机组主要用于向船舶观通、导航、雷达、声纳和指挥仪等特殊设备供电，以提高相关旋转设备调节速度。

2.1 工频变流机组的结构及其工作原理

工频变流机组由直流/交流组合机组、起动调速箱、调压调频控制箱及测量仪表等组成。

（1）直流/交流组合机组由同步电机、直流电机、空气冷却器、弹性联轴节和公共底座等组成。同步电机、直流电机和一般同步电机、直流电机原理结构相同，与蓄电池并联的直流电机应为幅压电机。

（2）起动调速箱用以实现自动起动直流电动机。

（3）调频调压控制箱包括以下几个部分：

1) 相复励恒压装置，也叫自励恒压装置。

2) 电压校正器，它由电压检测元件、比较电路和控制元件等组成。

3) 频率自动调整装置，它由频率检测装置、差动相敏

放大执行环节等电路组成。

工频变流机组是一组双向电源转换设备，可以作为直流发电机组运行（交流电动，直流发电），也可以作为交流发电机组运行（直流电动，交流发电）。

工频变流机组的能量转换关系如图 3.3-1 所示。

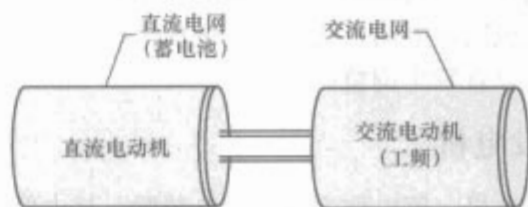


图 3.3-1 工频变流机组能量转换简图

（1）直流电动机的起动。工频变流机组起动时，为限制起动电流，通常将直流电动机串入起动电阻接到蓄电池上，随着转速上升，逐步切除起动电阻，待机组达到额定转速时，完全切除起动电阻。

（2）同步电机与电网并车。由于同步机容量相对电网容量较小，因此可认为变流机组与无穷大电网并车。当同步电机的电压幅值、相位和频率满足并网要求时，将同步电机投入电网，靠整步转矩将交流电机拉入同步，完成同步电机与电网的并联。

（3）变流机组自“直流电动，交流发电”向“交流电动，直流发电”状态的转换。

同步电机与电网并联之后，要使同步电机从发电状态转换为电动状态，转换的方法就是增加直流电机励磁电流，当直流电机电枢电动势高于蓄电池电压时，变流机组运行在“交流电动，直流发电”浮充电状态。如果需要给蓄电池进一步充电，可以通过适当的增加直流电机励磁电流来提高直流电机的输出电流，与此同时，与主电网并联运行的同步电动机将会自动调节交流输入功率以满足直流发电机输出功率增加的需要。

（4）变流机组从“交流电动，直流发电”向“直流电动，交流发电”状态的自动转换。

在主电网失电时，同步电机失去电源，但由于转子惯性，转速不会突变，同步电机仍产生交流电动势。由于同步电机定子回路与交流电网负载形成闭合回路，同步电机向交流负载供电，同步电机工作在发电状态，机组转速迅速下降，直流电机的电枢电动势随之下降。当直流电机电枢电动势小于蓄电池电压时，直流电机电枢电流反向，直流电机工作在电动状态，产生的电磁转矩将阻止转速下降。当直流电机的输出转矩与同步电机的制动转矩平衡时，转速不再下降。实际上频率自动调整装置在转速变化过程中会自动调节直流电机励磁电流，直至机组转速稳定在同步转速，进入新的稳定工作状态。

2.2 中频变流机组的结构及其工作原理

中频变流机组由中频发电机、直流电动机（或交流电动机）和控制设备三大部分组成，控制设备由起动器、自动电

压调整器和频率调整器组成。

中频发电机通常有两种结构，一种是普通的凸极发电机，另一种是感应子发电机，基本原理在本章第四节有介绍。

中频变流机组的交流发电机输出电压的频率是随着机组转速变化而变化的。

电压校正器由电压测量环节、信号放大及执行等几部分组成。

频率调节装置由频率测量电路、三角波发生器电路、整形放大电路、执行环节和稳定环节等组成。当发电机负载转矩变化时，转速将发生变化。采用频率调节装置，通过自动调节直流电机励磁电流保持频率稳定。

交流同步电动机或者异步电动机具有较硬的转速特性，因此，以交流同步电动机或者异步电动机作为原动机的变频机组通常不设置频率调整器。

3 轴带发电机

轴带发电机一般也称为轴带发电装置，是由船舶主机通过变速装置直接驱动发电机的发电设备，20世纪50年代就广泛应用于各类直流装置的船舶上，但由于难以解决主机转速变化导致频率无法恒定在规定值内等一些关键的技术难题，在中大型船舶上还是以交流柴油发电机组作为主电源。近年来，随着电力电子变流技术的发展，各种形式的轴带发电机装置应运而生，国内外不少船舶采用轴带发电机作为船舶辅助电站。

主要有以下几点：

(1) 船用交流轴带发电装置由主机拖动，消耗主机剩余功率，节约辅机燃料油，达到节能效果。

(2) 船舶低速航行时，增加轴带发电装置输出功率，可以减少主发电机组的运行台数。因为一般柴油发电机组单位功率耗油高于主机单位功率耗油，因此使用轴带发电装置不仅可以降低航行成本，同时还可以减少主发电机组的磨损，降低维修费用。

(3) 因为轴带发电机不需要独立的原动机，所以合理设计轴带发电装置，可以减少主发电机组的设计台数，提高舱室空间利用率，有利于机舱设备布置。

(4) 使用轴带发电装置，可以减少机舱噪音，改善机舱工作条件。

(5) 轴带发电机还可以在主机故障时运行在电动机状态，作为船舶的应急推进电机，从而提高整个船舶的生命力。

轴带发电机本身结构与一般发电机相同，根据发电机运行频率特点分为频率变动型和频率稳定型。

3.1 频率变动型轴带发电机的原理及分类

不使用机械和电气方法修正因为主机转速变化而引起的轴带发电机输出电压的频率波动，而是采用限制轴带发电机的使用时间和范围，并尽量控制主机的转速，使电网频率在一定的范围内而无过大波动。这种类型的轴带发电机也称为无频率补偿型轴带发电机，其结构示意图如图3.3-2所示。根据螺旋桨形式不同可分为定距桨和调（变）距桨轴带发电机。

定距桨轴带发电机只能应用在主机恒速范围内，频率随主机转速变动而变化，难以保持恒定，因此结构虽然简单但使用明显受到限制，因此现在已经很少应用。

变距桨轴带发电机适用于变距桨船舶，无论船舶是机动

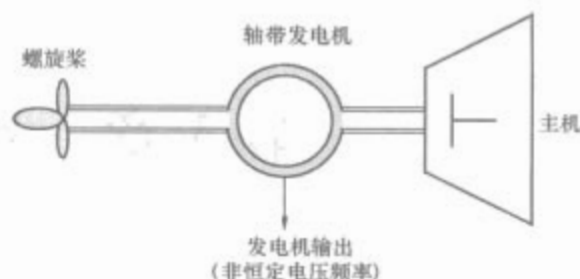


图 3.3-2 无频率补偿的轴带发电机示意图

航行还是正常航行，变距桨主机转速均保持不变，因此轴带发电机输出电压频率也基本保持恒定。在船舶航行中，主机转速恒定，轴带发电机利用率可接近100%。由于主机与其他形式的发电机组的调速特性不一致，因此，变距桨轴带发电机与船舶其他发电机组不能并联运行。

3.2 频率稳定型轴带发电机的原理及分类

通过机械或电气方法修正因主机转速变化而引起的轴带发电机输出电压的频率不稳定，使轴带发电机输出电压的频率保持恒定，这种轴带发电机又称为频率补偿型轴带发电机，它可以与船舶发电机长期并联运行。

主机轴带发电机由主机驱动，其转速是变化的，因此轴带发电机所发出的三相交流电的频率和电压均随之变化。可以经整流、逆变和无功补偿环节，运用频率、电压自动调节技术，最后向船舶电网提供恒频、恒压的电源。这种轴带发电机可以和其他发电机组长期稳定并联运行。

图3.3-3所示的就是频率稳定型轴带发电机的一种类型，其变速器的变比可调，根据主机转速的变化，调节变速器的变比，达到频率稳定的目的。

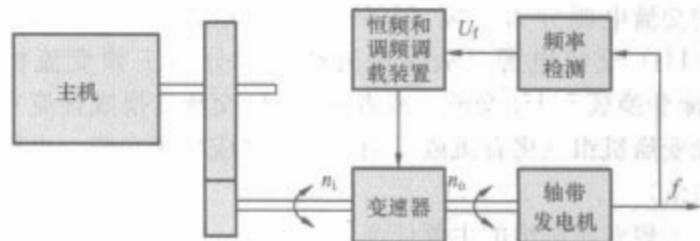


图 3.3-3 带可调变速器的轴带发电机示意图

应用最广泛的频率稳定型轴带发电机是晶闸管变频型轴带发电机，其结构示意图如图3.3-4。此外还可作为旋转同步调相机来提供无功功率。为改善谐波，而增设滤波装置。

图3.3-4所示的轴带发电机也称为全静止变频型轴带发电机，该系统原始造价较昂贵，但对降低运营成本，保证供电质量又有很大好处，所以仍然广泛使用。在此基础上还有一种所谓的部分静止变频型轴带发电机。其结构组成如图3.3-5所示。这种类型的轴带发电机一般只用于功率容量较小的船舶。

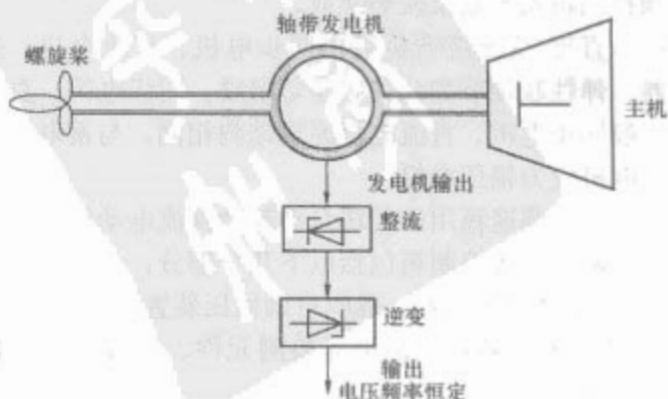


图 3.3-4 带整流—逆变装置的轴带发电机示意图

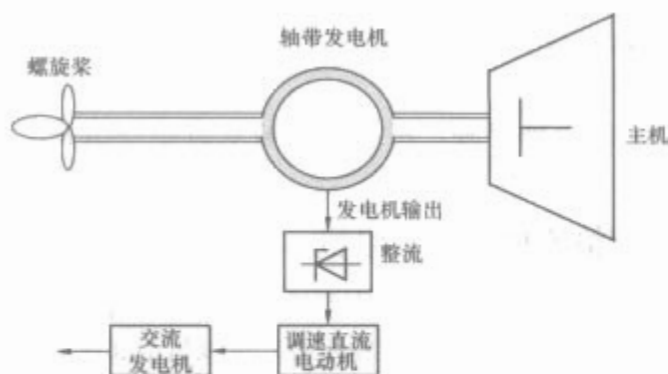


图 3.3-5 部分静止变频型轴带发电机

随着船舶电站容量的增大，现已推出高压轴带发电机，电压范围为 3~10kV，通常为 6.6kV，功率范围为 4000~10 000kW。目前这种新型轴带发电机的推出主要是为了适应新建集装箱船的需求，这些大型集装箱船往往要求装运为数甚多的冷藏集装箱，电力需求将上一个新台阶，船舶电站合理配置主机轴带发电机具有明显的优势。

4 感应子中频发电机

随着中频发电机工作频率的升高，电机磁极结构尺寸的限制使普通的凸极同步发电机难以满足工程要求，所以中频发电机通常都采用感应子式中频发电机。

4.1 感应子发电机的特点

感应子发电机的工作原理是基于转子（也称为感应子）表面齿槽的存在，在转子转动时，因气隙磁导变化引起定子电枢绕组中的磁链发生周期性的变化而感生电动势。与一般的同步发电机相比，感应子发电机有如下特点：

(1) 励磁绕组和工作绕组（也叫电枢绕组）都安装在定子上，转子上没有绕组，不需要集电环和电刷，具有结构简单、可靠性高、维护方便等优点。

(2) 气隙磁通的利用率较低，只有交变分量产生感应电动势，而交变分量一般只占气隙磁通的 35%~45%，因此，这种电机的有效尺寸比同容量的同步电机大，即这种电机的材料利用率不高。

(3) 因工作频率高，故漏电抗较大，因此短路电流较小；而当负载为感性时，其固有电压调整率较大，故通常要求在超前功率因素下工作。

(4) 感应子发电机空载特性和短路特性由于电机磁路的饱和影响，使气隙磁通的交变分量变小，从而导致电机的空载特性和短路特性并非线性变化。在励磁电流达到一定数值后继续增大时，空载电压和短路电流非但不增加，反而下降，如图 3.3-6 所示。

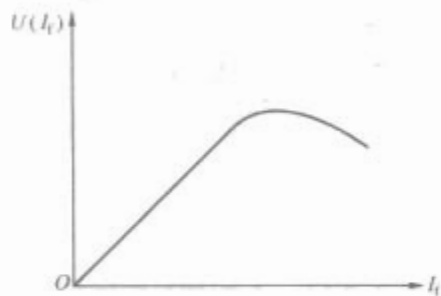


图 3.3-6 感应子发电机空载和短路特性

(5) 由于工作频率高，铁损耗较大，感应子中频电机效率比工频同容量同步电机的要低，因此要重视铁心冷却问题。

4.2 感应子发电机的结构及分类

感应子发电机一般按励磁方式和齿层结构分类。按励磁方式可分为两大类：同极式和异极式。

4.2.1 同极式（单极式，轴向磁通式）

励磁绕组为环状，放置平面与电机轴向垂直，形成轴向磁路系统（见图 3.3-7）；为充分利用另一个气隙，后又发展成双铁心结构（见图 3.3-8）。

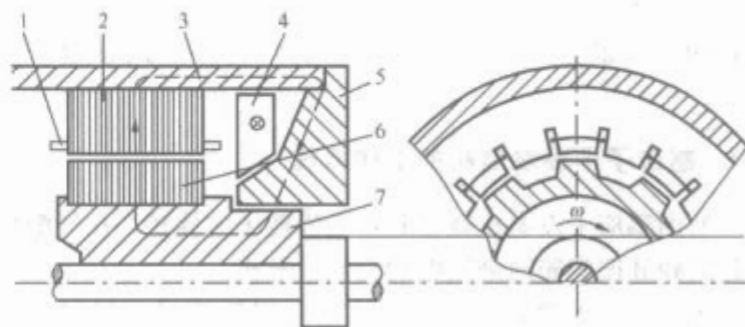


图 3.3-7 同极单铁心式结构

1—电枢绕组；2—定子铁心；3—机座；4—励磁绕组；
5—导磁端盖；6—转子铁心；7—转子支架

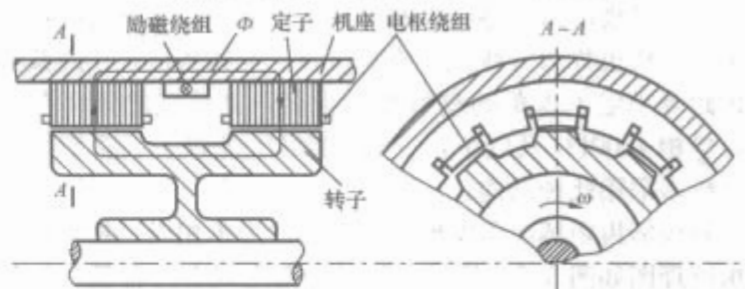


图 3.3-8 同极双铁心式结构

同极式感应子发电机的优点：转子齿内磁通不交变，无铁损，可采用实心转子把圆周速度提高到 150m/s，励磁绕组尺寸、质量均较小，定子铁心内表面利用率高，定子槽可全部用来放置工作绕组（感应电动势的绕组），无大槽、小槽之分。

同极式感应子发电机的缺点：磁路长，消耗磁动势多，且会产生轴电流，损坏轴承。机械惯性增大，有磁滞现象，时间常数较大，当突卸负载时容易引起过电压，且影响电压调节速度。另外，环形线圈的制造与维修均不方便。

4.2.2 异极式（多极式，径向磁通式）

有几个（成对的）励磁线圈，其轴线与转子的轴线垂直。励磁绕组和工作绕组分别放在定子的、小槽内，形成径向磁路，见图 3.3-9。

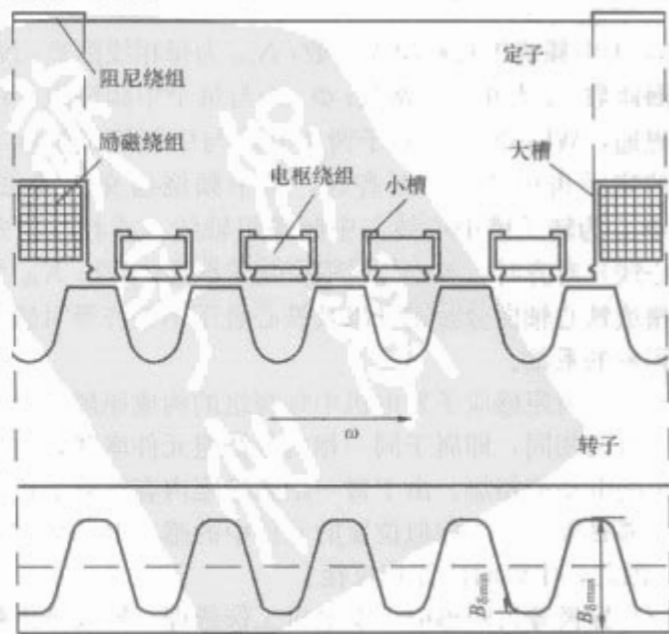


图 3.3-9 异极倍齿距单相感应子中频发电机结构原理

异极式感应子发电机的优点：质量减轻；磁极对数有选择的可能；励磁绕组的结构简单，制造与维修方便；轴承寿命长。

异极式感应子发电机的缺点：因转子机械强度的限制，转子表面线速度一般不超过 100m/s，从而限制了频率的提高。另外，定子铁心的内圆表面需要设置安放励磁绕组的大槽（占 8%~25%的空间），使工作绕组的数目减少，降低了利用率。

由上述分析对比可知，异极式励磁结构的优点较多，故它比同极式的应用较广。下面着重介绍异极式感应子发电机。

4.3 感应子中频发电机的工作原理

所谓感应子发电机就是利用带齿转子的旋转，在气隙内引起高频脉振的磁通来发电的交流发电机。

多齿转子的旋转，在气隙内产生脉振磁导，转过一个齿，磁导交变一个周期。当对定子励磁绕组加上直流励磁电流后，就会在气隙内引起脉振磁通。气隙内的脉振磁导和磁通由恒定分量和交流分量组成。

(1) 异极倍齿距感应子发电机工作原理。异极倍齿距感应子发电机也称为古典式，或罗伦兹——施米特式。因其转子齿距等于定子齿距的整数倍而得名，其适宜的频率范围为：单相 4000Hz 及以下，三相 2000Hz 及以下，船舶中频发电机多采用此种结构。

异极倍齿距感应子发电机可以设计为单相或三相。单相结构原理图如图 3.3-9 所示，转子外圆上只有一种槽，均匀分布。定子上冲有两种槽，即大槽和小槽。大槽通常为四或六个，沿圆周均匀分布。大槽内嵌放励磁绕组，通入直流电后，在定子内腔形成四或六个极性交替的磁场。每两个大槽间均匀分布着若干个小槽，在其中嵌放中频绕组。图 3.3-9 示出了气隙磁通密度的分布。气隙磁通可分解为恒定分量和交变分量，其中交变分量的周期相当于一个转子齿距。交变分量在中频绕组内所感应的电动势频率 f (Hz) 为

$$f = \frac{t_r n}{60} \quad (3.3-1)$$

式中： t_r 为转子齿数； n 为转子转速，r/min。

中频绕组中的感应电动势（每相）有效值为

$$E = 4.44 f_B N_\Phi \Phi_- K_{sk} \quad (3.3-2)$$

式中： $N_\Phi = \frac{N_{c\Phi} N_c}{a}$ ， $\Phi_- = \frac{1}{2} (\Phi_{\max} - \Phi_{\min})$ ； f_B 为磁场波形因数； N_Φ 为中频绕组每相串联匝数； $N_{c\Phi}$ 为每相线圈数； N_c 为每线圈匝数； a 为并联支路数； Φ_- 为与每个中频绕组交链的交变磁通，Wb； Φ_{\max} 为转子齿中心线与中频绕组轴线（或相应的定子齿中心线）对齐时，与中频绕组交链的磁通，Wb； Φ_{\min} 为转子槽中心线与中频绕组轴线（或相应的定子齿中心线）对齐时，与中频绕组交链的磁通，Wb； K_{sk} 为考虑斜槽或铁心轴向分段错开以及铁心叠压不整齐等对感应电动势影响的系数。

异极倍齿距感应子发电机中频绕组的构成原理与一般同步发电机的相同，即属于同一相的各绕组元件串联时，应使其感生的电动势相加。由于每一励磁极距内有整数个转子齿距，相邻磁极下处于相似位置的元件中的感应电动势相位差 180°，因此，串联时应互相反接。

(2) 异极等齿距感应子发电机工作原理。异极等齿距感应子发电机也称为梳齿式，或盖氏式。因其转子齿距等于定

子齿距而得名，其适宜的频率范围为：单相 4000~10 000Hz，三相 2000Hz 以上。因其频率较高，于舰船上应用较少。

除上述两种以外，还有所谓的双齿距绕组式、干扰式等。

5 多相整流型同步发电机

多相整流型无刷励磁同步发电机与传统的直流发电机相比，具有无换向火花、无炭粉污染、可以与中高速原动机配套、容量不受机械换向器限制、可靠性高、维护保养简单等一系列优点。因此，在许多领域中多相整流型发电机正在逐步地替代传统直流发电机作为大容量直流电源。

5.1 多相整流同步发电机结构原理

多相整流发电机的相数一般为 $m = 3, 6, 9, \dots, 3k$ ($k=1, 2, 3, \dots$)，由于三相整流发电机结构与一般三相交流同步发电机相同，且脉动系数过大，除了小容量的整流发电机外，通常多相整流发电机是指 $m = 3k$ 相 ($k > 1$)，即六相、九相、……等多相带整流装置的同步发电机，其转子结构与常用三相交流同步发电机类似，可以采用无刷励磁方式励磁。

为了减小整流电压脉动系数，多相整流发电机定子绕组宜采用 $k(k > 1)$ 个 Y 接法互移 $\frac{\pi}{3k}$ 电角度非对称接法绕组。

下面以十二相整流发电机为例，十二相整流同步发电机原理图如图 3.3-10 所示。该发电机转子铁心与绕组结构形式和通常的三相交流发电机类似，定子十二相绕组采用 4Y 移 15° 绕组，其定子相电压相量图如图 3.3-11 所示。

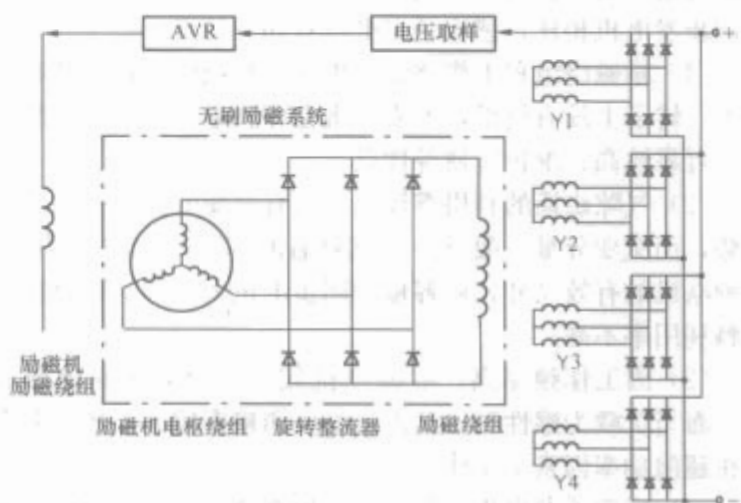


图 3.3-10 十二相整流同步发电机原理图

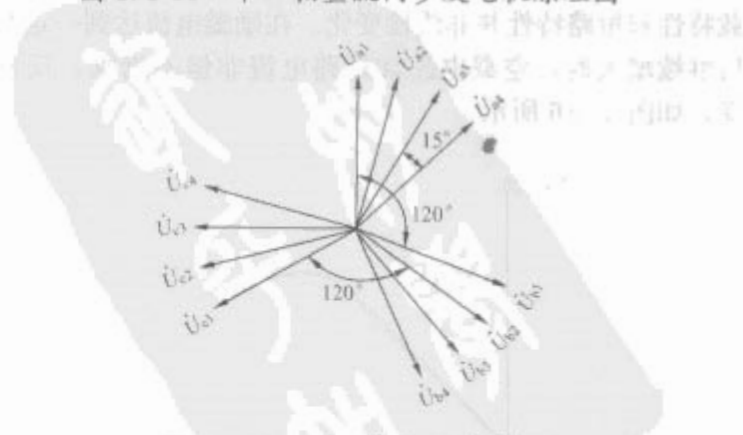


图 3.3-11 十二相电压相量图

图 3.3-11 中十二相绕组由 4 个互移 15° 电角的三相绕组组成，四个三相绕组中点不连接在一起，每个三相交流绕组分别接到一个三相整流桥输入端，四个三相整流桥直流侧可以采用直接并联的接法（能够输出比较大的电流），也可以

采用串联接法（能够输出比较高的电压），还可以采用两串两并的接法。为了提高电机集成化程度，减少电机引出电缆，降低电磁干扰，一般都将十二相整流装置、励磁调节装置设置在电机内部，与发电机共用一套冷却系统。以下分析以四个三相整流桥直接并联接法为例。

5.2 十二相整流同步发电机的运行性能与特点

5.2.1 整流电压波形

十二相同步发电机带整流负载时，总是处于时变的不对称运行状态，系统拓扑结构变化多，状态方程阶次高。

（1）空载整流电压波形。若输入电压为正弦，4Y移15°电角的空载十二相整流电压为对称的每周期24个脉波的电压。

脉动系数 $r_{u0} = 2/(23 \times 25) = 0.348\%$ 。

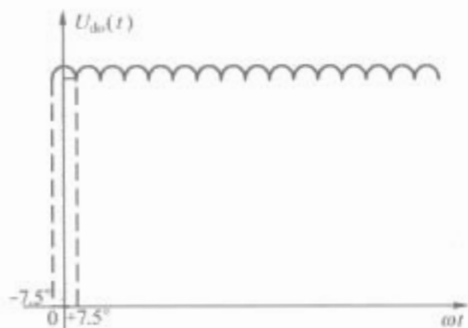


图 3.3-12 空载整流电压波形

（2）如果不考虑换相电抗的影响。十二相整流装置24只整流二极管在任意时刻始终工作在2—2管交替导通状态，各相电流波形如图3.3-13，每次连续导通时间为15°电角，每周导通4次，电流幅值为直流侧总电流 I_d 。

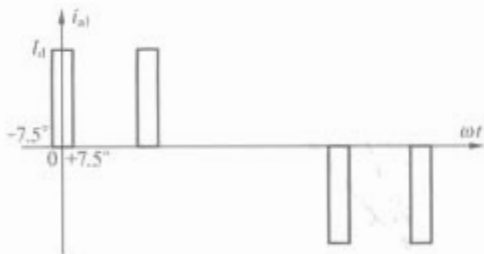


图 3.3-13 相电流波形图

（3）如果考虑换相电抗影响。一般地，当直流侧电流 I_d 从0逐步增大时，十二相整流桥将会依次从2—2管交替导通状态→2—4管交替导通状态→4—6管交替导通状态→6—8管交替导通状态→8—9管交替导通状态→9—10管交替导通状态→10—11管交替导通状态→最后11—12管交替导通状态→12—12管交替导通（即直流侧短路）。

当直流负载电流从0增大时，各相电流由于换相电感作用不能突变，出现进入导通与退出导通相电流同时导通的现象，其间隔称之为换相重叠角，电流越大，换相重叠角越大，在电流较小时交流相电流为双峰波。

通常在额定负载工作状态，交流相电流持续时间宽度将大于120°电角，即为8—9管交替导通状态。图3.3-14（a）、（b）分别为交流电流波形和整流输出电压波形。

图中交流电流幅值约为 $1/4 I_d$ ， U_{dc} 的脉动系数可以达到1%以内的要求。

5.2.2 十二相整流发电机的功率因数

在额定工作条件下，视在功率因数 $\cos\varphi_1$ 可以高达0.9以上，基波 $\cos\varphi$ 在0.7~0.8之间，但在负载较小时 $\cos\varphi$ 较低。

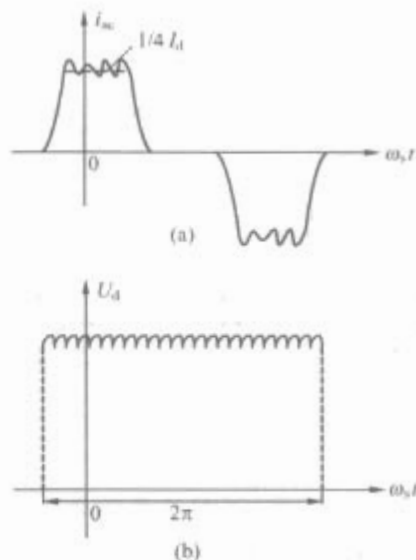


图 3.3-14 交流电流波形和整流输出电压波形图

（a）交流电流波形；（b）整流输出电压波形

6 交直流电力集成双绕组发电机

三相交流/多相（六相、九相或十二相）整流同时供电的双绕组发电机，是一种全新的独立供电系统，该发电机具有体积小、质量轻、制造成本低和交流电压波形畸变率小及直流电压脉动系数小等一系列显著优点，特别适用于同时需要交流和直流电源的舰船、飞机、移动通信站、石油钻井平台等独立系统。

6.1 双绕组发电机的基本结构和原理

在发电机一套定子铁心槽内，布置有两套绕组：一套绕组是三相交流绕组，向外输出三相交流电，称之为交流绕组；另一套多相绕组（一般取六相、九相或十二相），经集成于电机内的整流装置变换后直接输出直流电，称之为直流绕组或整流绕组（如十二相绕组常采用4Y移15°电角绕组，用 $a_1, b_1, c_1, i = 1, 4$ ，分别表示4个三相绕组）。两套定子绕组共用一套定转子铁心和励磁绕组。转子上除了布置有与普通三相交流电机一样的励磁绕组（fd）、直轴阻尼绕组（kd）、交轴阻尼绕组（kq）外，还有一套交轴稳定绕组（fq），用于改善系统稳定性。

双绕组发电机励磁调节一般采用稳定调节交流电压，直流电压浮动的调节方式。

图3.3-15表示两套定子绕组和转子绕组的相对嵌放位置，图3.3-16表示双绕组发电机定转子电路原理。

6.2 直流电压脉动和交流电压波形畸变

在交直流混合供电发电机电系统中，整流绕组中整流元件电流换相过程会通过定子绕组互感耦合传递到交流绕组中，

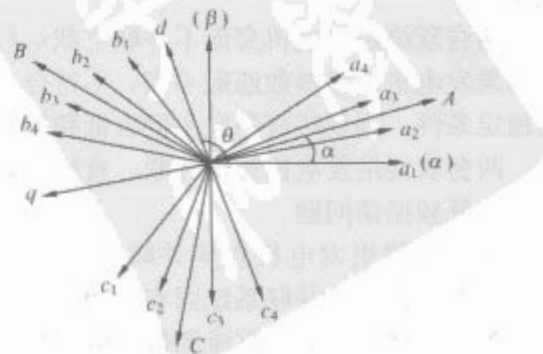


图 3.3-15 定子和转子轴线相对位置

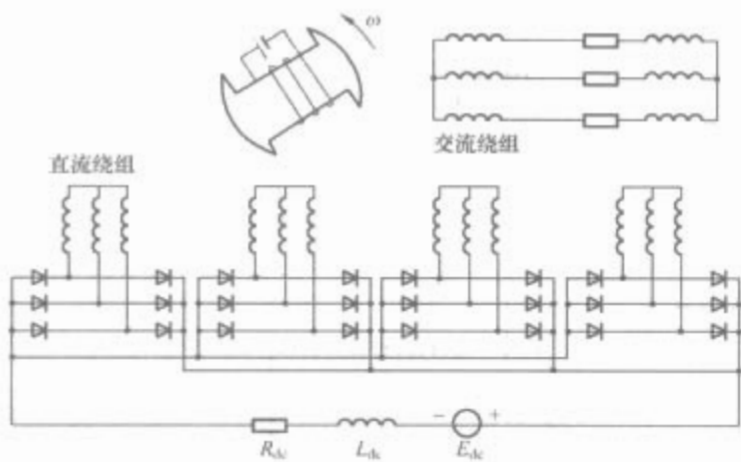


图 3.3-16 定转子电路原理

造成交流电压波形畸变；同样交流绕组电流的变化也会通过绕组之间的互感耦合传递到整流绕组中，引起整流绕组电压的不对称，导致整流输出电压脉动系数的增大。

6.2.1 直流电压脉动系数

在三相交流/十二相整流双绕组发电机中，由于采用 $4Y$ 移 15° 电角十二相整流绕组，其输出电压脉动二十四脉波。一般情况下，三相交流电流对称，4 个 Y 绕组与三相交流主绕组之间的互感（对应主磁路磁通部分）是相同的。所以，虽然 4 个 Y 绕组与三相交流主绕组之间的互漏感不相同，但由于互漏感本身数值很小，由此引起的十二相电压不对称数值不大。因此，双绕组发电机中十二相整流输出电压脉动系数和十二相整流发电机输出电压的脉动系数相近，只要两套绕组设计合适，其直流电压脉动系数可以做到 1% 以下。

6.2.2 交流电压波形畸变率

如果直接在三相交流发电机输出端挂接容量较大的三相整流负载，通常由于整流元件电流的换相将会导致交流电压波形的严重畸变。但是如果在同一发电机定子槽内嵌放两套三相绕组，一套给交流负载供电，另一套给整流负载供电，则整流电流元件的换相对交流负载电压波形影响明显减小。

在三相交流/十二相整流双绕组发电机中，因为十二相整流装置是由 4 个三相整流桥并联构成的，在额定负载工作时，十二相整流装置通常工作在 8—9 管交替导通状态，即 4 个三相整流桥在任意时刻只有一个三相整流桥处于换相状态。换相电流幅值仅为整流输出电流的 $1/4$ 左右，所以，换相过程对三相交流电压波形畸变影响大大减小。只要两套绕组设计合适，可以保证三相交流电压波形畸变率小于 1%。

从以上分析可以看出，三相交流/十二相整流双绕组发电机交直流输出电压波形比较理想，容易满足电磁兼容标准。

6.3 双绕组发电机供电系统的稳定性

两台交直流双绕组发电机可以实现交流并联运行、直流并联运行或者串联运行向交直流负载供电。理论分析和试验研究表明：

(1) 两台双绕组发电机交流不并联空载运行，直流并联供电，如果发电机电磁参数匹配不当，不符合多相整流发电机微变稳定条件，则系统容易发生固有低频振荡。

(2) 两台双绕组发电机交流并联，直流串联供电，系统不存在固有低频振荡问题。

(3) 两台双绕组发电机直流并联供电，交流并联运行时，可以显著改善直流并联系统固有低频功率振荡。

(4) 单台双绕组发电机直流侧带反电动势负载，交流绕组输出带负载后能改善系统的稳定性，交流负载功率因数越

低或者负载越大，对稳定性的改善越明显。

(5) 在隐极式双绕组发电机转子上设置合适的交轴短路绕组，可以保证电磁参数的匹配，使系统具有足够的稳定性，而且不影响电机的其他性能。

7 感应发电机

感应电机作发电机运行需同时满足电机所需的无功励磁电流和转子转速大于旋转磁场的转速两个基本条件。

7.1 传统感应发电机

传统的独立运行的感应发电机如图 3.3-17，依靠发电机剩磁，并借助交流电容自励的方式建立空载电压，其原理与并励直流发电机相似，其建压过程如图 3.3-18 所示。

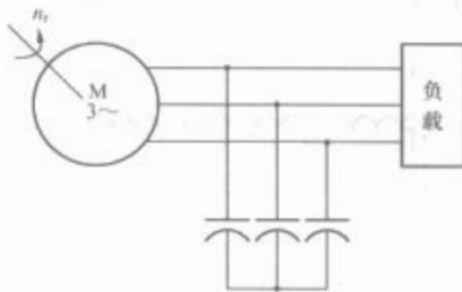


图 3.3-17 传统的独立运行的感应发电机

图 3.3-18 中的直线 2，其斜率为 $\tan\theta = \frac{U_0}{I_0} = \frac{1}{\omega_0 C}$ ，称为自励电容线。

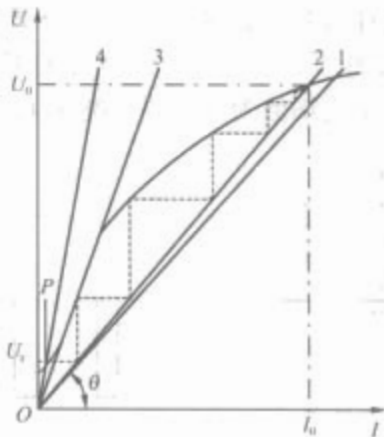


图 3.3-18 感应发电机自励建压过程

空载时，电机转速一定的前提下，电机的空载曲线是确定的，自励的物理过程是：剩磁电动势 U_i 通过外接交流电容产生一定的无功电流，该无功电流形成的旋转磁场将产生更大的励磁电动势，如此反复直至稳定，显然稳定点即为自励电容线与空载曲线的交点。

由以上分析可知，感应电机自励条件如下：

(1) 电机应有剩磁。

(2) 自励电容应大于与电机运行转速相对应的临界电容值。

感应发电机虽然可以依靠合适的电容和转速实现空载自励建压，当带上负载后，由于负载的电枢反应和定、转子漏抗产生的滞后感应功率，以及感应发电的原理，通常将会使得电压、频率均产生一定的变化，且当负载超过某一临界值后将会出现电压坍塌的现象。因此，为了保证感应发电机的稳定带载性能，人们尝试了多种方法来解决感应发电机的调压调频问题。

作为工作于恒频恒压模式的感应发电机，根据感应发电的原理，解决调压调频问题，必须同时进行无功功率和有功功率的补偿。

早期的感应发电机多采用投切电容来实现自励电容的改变,根据负载大小补充一定的超前无功功率,从而实现电压的调节;通过研究表明,当自励电容一定时,感应发电机的带载能力与转速在一定范围内呈单调递增的关系,据此提出了通过控制原动机的转速来实现电压的调节。因此,早期的感应发电机需要结合以上两种方法才能实现调压调频问题。

以上两种方法均存在一定的局限性,前者的调节电容组数将限制其调节范围,且还存在系统复杂和响应缓慢等问题;后者虽然实现较为容易,但要求原动机具有较宽广的转速可调范围,且还存在响应缓慢和带载能力弱等问题。

7.2 新型感应发电机

20 世纪 80 年代以来,随着大功率的电力电子器件的发展,针对独立运行的感应发电机的调压调频问题,提出了多种解决方式,主要有以下两种方式:

(1) 整流逆变调压调频方式,如图 3.3-19 所示,通过合理设计使电机在不可控整流工作方式下的负载特性较硬,这样通过高频整流方式后变换到额定电压时,可保证其占空比在很小的范围内变化,实现高频整流桥的优化控制,再经逆变装置提供所需的恒频恒压电源,该方法需要两套与发电机同等容量的电力电子变流装置,且为减小谐波影响以保证供电品质需要在交流输出端串接滤波电感。同时,由于电机没有外接交流自励电容,高频整流桥的直流侧需要并接外接直流电源以提供发电机起励所需的无功电流,虽然可以通过在电机交流侧并接电容实现自励,但此时在高频整流桥交流侧需串接合适的电感以避免高频谐振。由于大容量的变频装置存在电磁兼容性及成本较高的问题,该方式适用于中、小功率等级的应用场合。

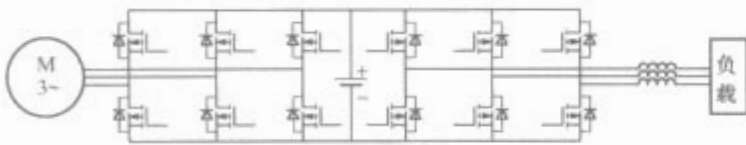


图 3.3-19 背靠背整流逆变型感应发电机系统原理图

(2) 定子辅助交流励磁调压调频方式,如图 3.3-20 所示,通过交流无功补偿装置实现定子辅助励磁,这种方法适用于普通电机,由于无功补偿装置采用了高频 PWM 技术,将产生大量的高次谐波,因此需要在无功装置的输出端增设交流滤波电感,为了调节有功以保证频率的恒定,还需要在辅助励磁装置的直流侧并接直流电源。

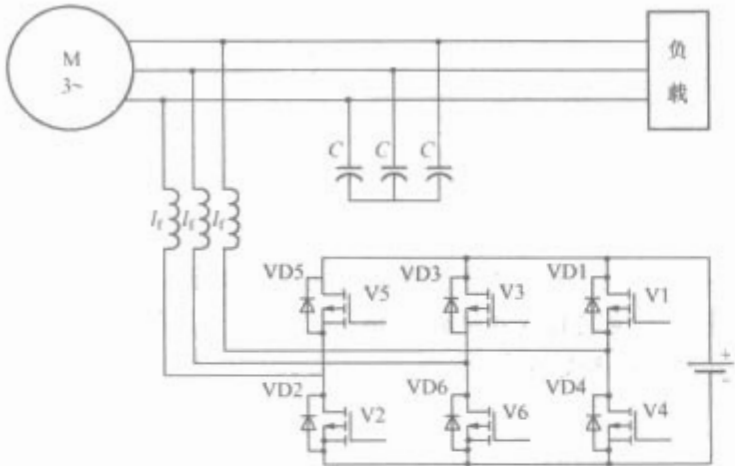


图 3.3-20 定子交流励磁调压方式的感应发电机原理图

通过上面的分析,可以看出,为了实现感应发电机的调频,通常都需要外接电源,为了避免外接电源所带来的系统复杂性,采用外接不可控整流桥负载以避免负载对频率的敏感性,该方式同样适用于图 3.3-20 的发电结构,但由于该系统存在供电品质难以提高(理想的三相不可控整流的电压脉动系数为 5.7%)以及电磁兼容性差等缺点。因此,提出了如图 3.3-21 所示的双绕组感应发电机系统,该电机在定子上设置两套绕组,一套 m 相(如 $m=3、6、9、12$ 等)功率绕组,外接 m 相自励电容和 m 相不可控整流桥,功率绕组的相数由供电品质的要求决定,另外一套三相辅助励磁绕组,外接无功交流励磁装置,两套定子绕组结构避免了物理连接,仅有磁耦合,从而大大削弱了无功励磁装置产生的谐波对功率绕组的影响,故无功励磁装置输出端仅需接有较小的滤波电感或取消。与普通的感应发电机的另外一个较大的区别在于该系统在整流桥负载交流侧并接了自励电容,电容电流可以突变而电压不能突变的特性加速了整流桥的换相过程,且如果电容值的选择与电机参数相匹配,将会使整流桥的等效基波负载呈容性或弱感性,从而大大降低了因抵消电枢反应的去磁作用所需的无功补偿容量,因而该系统中的辅助励磁装置的无功容量通常为电机容量的 20%~30%,故该结构适合于大功率的应用场合,是一种具有良好应用前景的发电模式。

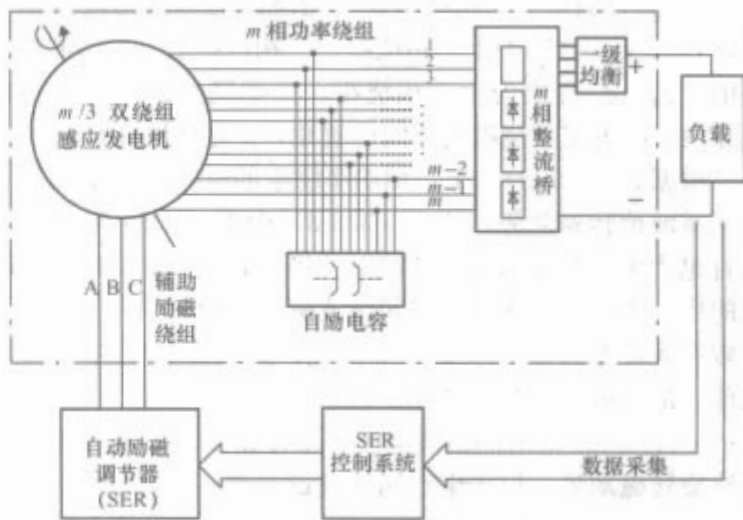


图 3.3-21 双绕组感应发电机原理图

7.3 12/3 相双绕组感应发电机

应用于舰船等特殊场合的感应发电机,由于直流品质要求较高,通常选用十二相整流的形式,本文以 12/3 双绕组感应发电机为例进行系统的说明。

7.3.1 稳态特性

(1) 空载特性。传统感应发电机需要通过电容自励建立相应的空载电压(通常接近额定电压),然而在双绕组感应发电机中不需要建立额定电压,正常情况下的剩磁电压已可满足励磁调节器的工作条件,根据电机的基本理论,得到三相补偿绕组和十二相功率绕组的合成磁动势

$$F_p = \sum_{k=1}^4 F_{Yk} = \frac{12}{\pi} \frac{W_p I_{1m}}{p} \left\{ k_{dp1} \sin(\omega_s t + \varphi_1 - \alpha_0) + \sum_{v=24k \pm 1}^{\infty} \frac{k_{dpv}}{v} \sin(\omega_s t + \varphi_1 \mp v \alpha_0) \right\} +$$

$$v > 1 \delta_4 > 0$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{n=6j \pm 1}^{\infty} \frac{12}{\pi} \frac{W_p I_{mm}}{p} \\
 & n > 1, \delta_j > 0 \\
 & \left\{ \sum_{z=24k \pm n}^{\infty} \frac{k_{dpc}}{z} \sin(n\omega_s t + \varphi_n \mp z\alpha_0) + \right. \\
 & \quad \left. z > 0, \delta_k \neq 0 \right. \\
 & \quad \left. \frac{k_{dpc}}{n} \sin[n(\omega_s t - \alpha_0) + \varphi_n] \right\} \quad (3.3-3) \\
 F_C = & \frac{3}{\pi} \frac{W_c I_{cim}}{p} \left[k_{cdpl} \sin(\omega_s t + \varphi_{cl} - \alpha_0) + \right. \\
 & \sum_{v=6i \pm 1}^{\infty} \frac{k_{cdpv}}{v} \sin(\omega_s t + \varphi_{cl} \mp v\alpha_0) \left. \right] + \\
 & i \geq 0, \delta_i > 0 \\
 & \sum_{n=6j \pm 1}^{\infty} \frac{3}{\pi} \frac{W I_{cm}}{p} \left\{ k_{cdpl} \sin(n\omega_s t + \varphi_{cn} \mp \alpha_0) + \right. \\
 & j > 0, \delta_j > 1 \\
 & \quad \left. \sum_{z=6k \pm 1}^{\infty} \frac{k_{cdpz}}{z} \sin[n\omega_s t + \varphi_{cn} \pm (6j - n)z\alpha_0] \right\} \\
 & z > 0, \delta_k \geq 0 \\
 & \quad (3.3-4)
 \end{aligned}$$

式中: W_p 、 W_c 分别为十二相绕组、三相绕组的串联匝数; k_{dpc} 、 k_{cdpv} 分别为十二相绕组、三相绕组的 n 次谐波绕组系数; I_{mm} 、 I_{cm} 分别为十二相绕组、三相绕组的 n 次谐波电流幅值; φ_n 、 φ_{cn} 分别为十二相绕组、三相绕组的 n 次谐波电流相位; α_0 为定子绕组的空间位置角; p 为电机极对数。

根据式 (3.3-3), 十二相功率绕组的时间基波电流不仅产生基波旋转磁动势, 如式 (3.3-3) 中第 1 项的前一部分, 而且也产生了高次的空间谐波磁动势, 如式 (3.3-3) 中第 1 项的后一部分, 这些高次空间谐波磁动势相对于转子本身具有较高的转差频率, 主要产生损耗; 式 (3.3-3) 中第 2 项的前一部分可分为两种情况: 对于 $n = 6j \pm 1$ 且 $n \neq 24j \pm 1$ ($n > 1, j > 0$) 的时间谐波电流, 不存在 $z \neq 1$, 故不会产生基波旋转磁动势, 仅产生空间谐波磁动势; 对于 $n = 24j \pm 1$ ($n \geq 1, j \geq 0$) 的时间谐波电流, 存在 $z = 1$, 故会同时产生基波旋转磁动势和空间谐波磁动势。

除此以外, $n > 1$ 的时间谐波电流形成的磁场与基波电流形成的磁场的一个重要差异在于: 只有时间谐波电流会产生同次的空间谐波磁动势, 如式 (3.3-3) 和式 (3.3-4) 中第 2 项的后一部分, 这些空间谐波磁场与基波电流形成的基波磁场具有相同的旋转频率, 对于低次谐波而言 ($1 < n < 23$), 其在转子上感应出的频率也为一低频的交流分量, 该分量也会产生机电能量转换的作用, 从这一点讲, 这些谐波所起作用与时间基波电流产生的基波磁场作用是相同的, 这也是空载起励时发生谐波振荡的重要因素之一。

(2) 自励电容对换向过程的影响。由于在整流桥交流侧并接有自励电容, 电容具有保持电压连续但允许电流突变的特性, 该特性加速了整流桥的换向过程, 有利于改善整流桥负载的基波功率因数, 即其电枢反应要小于传统的整流桥负载, 从而有利于减小辅助励磁绕组的容量。

(3) 自励电容的优化设计。并接在整流桥交流侧的自励电容不仅影响负载的电枢反应, 且可起到改变辅助励磁绕组容量的双重作用。据此提出了多种优化方案, 其中对于中小容量的双绕组感应发电机系统, 可选择以辅助励磁绕组容量 Q 最小的优化目标, 即通过调整自励电容的大小, 使辅助励磁绕组的在工作范围内的容量处于 $[-Q_{\min}, +Q_{\min}]$ 的闭区间; 而对于大容量的双绕组感应发电机系统, 可选择以效率最高的优化目标, 考虑到在负载一定的条件下自励电容的变化不会影响转子损耗和定子铁心损耗, 即通过调整自励电容的大小, 使定子侧的损耗为最小时, 其效率将达最高。

7.3.2 短路特性

根据十二/三相双绕组感应发电机的工作原理, 十二相输出直流侧的短路分析可以等效为十二相交流侧同时短路和三相绕组开路的分析, 按此原理并结合多相电机短路分析的基础, 可以得到 abc 坐标系下短路电流的表达式, 如式 (3.3-5) ~ 式 (3.3-7) 所示。

$$\begin{aligned}
 i_{ai} = & a_1 e^{-\frac{t}{T_m}} \cos\left[\omega_1 t - (i-1) \frac{\pi}{12} + \varphi - \varphi_p\right] + \\
 & a_2 e^{-\frac{t}{T_s}} \cos\left[\omega_2 t - (i-1) \frac{\pi}{12} + \varphi - \varphi_r\right] \quad (3.3-5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_{bi} = & a_1 e^{-\frac{t}{T_m}} \cos\left[\omega_1 t - (i-1) \frac{\pi}{12} + \varphi - \frac{2\pi}{3} - \varphi_p\right] + \\
 & a_2 e^{-\frac{t}{T_s}} \cos\left[\omega_2 t - (i-1) \frac{\pi}{12} + \varphi - \frac{2\pi}{3} - \varphi_r\right] \quad (3.3-6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_{ci} = & a_1 e^{-\frac{t}{T_m}} \cos\left[\omega_1 t - (i-1) \frac{\pi}{12} + \varphi + \frac{2\pi}{3} - \varphi_p\right] + \\
 & a_2 e^{-\frac{t}{T_s}} \cos\left[\omega_2 t - (i-1) \frac{\pi}{12} + \varphi + \frac{2\pi}{3} - \varphi_r\right] \quad (3.3-7)
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 a_1 = & -\frac{U_m}{l'} \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_s}\right)^2 + \omega_2^2}{\left[\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_s}\right)^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2\right] \left[\frac{1}{T_m^2} + (\omega_1 - \omega_s)^2\right]}} \\
 a_2 = & -\frac{U_m}{l'} \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_s}\right)^2 + \omega_1^2}{\left[\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_s}\right)^2 + (\omega_2 - \omega_1)^2\right] \left[\frac{1}{T_s^2} + (\omega_2 - \omega_s)^2\right]}}
 \end{aligned}$$

$$T_1 = \frac{l_{pp}}{r_p}, T_2 = \frac{l_r}{r_r}, \tau = 1 - \frac{4l_{mp}^2}{l_{pp}l_r}$$

$$l' = \tau l_{pp}, \sqrt{\frac{4(1-\tau)}{\tau^2 T_1 T_2} + \left(\frac{1}{\tau T_2} - \frac{1}{\tau T_1} - j\omega_r\right)^2} = \frac{1}{\tau T_0} - j\omega_0$$

且 $\omega_0 > 0$, $\frac{1}{T_m} = \frac{1}{2\tau} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_0}\right)$, $\frac{1}{T_s} = \frac{1}{2\tau} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_0}\right)$, $\omega_1 = \frac{1}{2}(\omega_r - \omega_0)$, $\omega_2 = \frac{1}{2}(\omega_r + \omega_0)$, $l_{pp} = l_{lp} + 4l_{mp}$, r_p 分别为十二相绕组的自感、电阻; l_r 、 r_r 分别为折算到十二相绕组的转子自感、电阻; l_{mp} 为十二绕组中单 Y 绕组的等效励磁电感; ω_r 为转子旋转电角频率; φ 为 a 相电压初始相位。

$$\varphi_p = \arctan \frac{a_2 \left[-\frac{1}{T_m} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_m} \right) - (\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 - \omega_s) \right] + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_m} \right) \left[-\frac{1}{T_m} (\omega_1 - \omega_2) + \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_m} \right) (\omega_1 - \omega_s) \right]}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_m} \right) \left[-\frac{1}{T_m} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_m} \right) - (\omega_1 - \omega_2)(\omega_1 - \omega_s) \right] - a_2 \left[-\frac{1}{T_m} (\omega_1 - \omega_2) + \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_m} \right) (\omega_1 - \omega_s) \right]}$$

$$\varphi_s = \arctan \frac{\omega_1 \left[-\frac{1}{T_s} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_s} \right) - (\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 - \omega_s) \right] + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_s} \right) \left[-\frac{1}{T_s} (\omega_2 - \omega_1) + \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_s} \right) (\omega_2 - \omega_s) \right]}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_s} \right) \left[-\frac{1}{T_s} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_s} \right) - (\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 - \omega_s) \right] - \omega_1 \left[-\frac{1}{T_s} (\omega_2 - \omega_1) + \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_s} \right) (\omega_2 - \omega_s) \right]}$$

根据多相短路基本理论,十二相整流直流侧短路电流最大值等于其交流侧短路电流最大值的 3.831 倍,即

$$i_{\text{dcmax}} = 3.831 i_{\text{pmax}} \quad (3.3-8)$$

8 船用交流静止电源

船用交流静止电源是指采用电力电子电路替代传统的交流发电机,将交流电能或直流电能转换为频率和电压符合船上用电设备需要的电能变换装置。当输入电源为直流电源时,该装置称为逆变器。当输入电源为交流电源时,一般先采用某种形式的整流器将其变为直流电源,然后再利用逆变器将其转换为电压、频率符合用电设备需要的交流电源。如果输出频率可调,则该装置通常又称为变频器。

8.1 逆变电源的原理、分析、设计

直流—交流功率变换称为逆变。直流—交流功率变换是通过逆变器实现的。在电力电子变换和控制领域中,逆变器的应用非常广泛,不仅变频变压(VVVF)负载、变速传动用交流电动机、恒频恒压(CVCF)交流负载等需要逆变器供电,很多直流变换系统中,例如通信系统中广泛应用的直流开关电源的中间变换环节通常也都有一个高频逆变器。另外,在不间断功率电源(UPS)、静态无功补偿器、有源滤波器、柔性交流输电系统(FACTS)、电压补偿器以及直流输电系统等电力电子装置中,逆变器都是其中重要的环节。

8.1.1 逆变电源的原理和分析

逆变器类型很多,最常用的是单相和三相桥式逆变器。目前功率最大的逆变器采用 GTO,其次 IGBT、MCT、SIT、BJT,小功率则用 P-MOSFET。要求开关频率高则采用 P-MOSFET、SIT,其次 IGBT、MCT,最低者是 GTO。

按照输出波形的类型,把具有输出电压波形独立可控拓扑的逆变器称为电压型逆变器(VSI)。电压型逆变器的输入端并接有大电容,逆变器将直流电压变换为交流电压,因此也称为电压源型逆变器(VSI)。由于这类逆变器能满足许多场合的要求而得到十分广泛的应用。类似地,把具有输出电流波形独立可控拓扑的逆变器称为电流型逆变器(CSI)。电流型逆变器的输入端串接有大电感,形成平稳的直流电源。电流型逆变器由于需要串接质量和体积较大的电感,这是其使用不广泛的一个重要原因,但在对电压波形的品质要求较高的中压场合仍得到广泛的应用。图 3.3-22 是电压型三相逆变电源电路原理图。

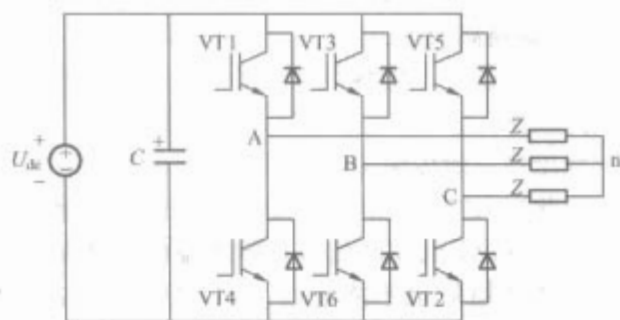


图 3.3-22 电压型三相逆变电源电路原理图

电压型逆变器的直流输入电压可以来自整流器,通常为晶闸管相控整流器,亦可来自其他直流电源,如蓄电池。直流电源若为整流器,通常需要通过电容 C 滤波或 L、C 滤波环节向逆变器供电,逆变器的输出再通过一个交流滤波器对

交流负载供电。其中直流电容器电容量较大,电压稳定,因而构成了一个电压源;而电感的主要作用是限制逆变器直流电源中的高频电流。设置电容器 C 是必要的,电感 L 则不一定,在某些逆变器产品中取消了电感 L,这样可以减小逆变器质量体积,降低成本,但交流电源的电流波形中则含有大量谐波电流。

逆变器的调制技术控制功率开关的通断时间的长短和开关顺序。最常见的调制技术有基于载波的调制技术,如正弦波脉宽调制(SPWM)、空间矢量(SV)技术和选择性谐波消除(SHE)技术等。其中 SPWM 波形的生成方法的实现方式主要有两种:

(1) 模拟电路实现法。可以用模拟电路构成三角波载波和正弦调制波发生电路,用比较器来确定它们的交点,在交点时刻对开关功率器件的通断进行控制,就可以生成 SPWM 波形。但这种模拟电路结构复杂,难以实现精确的控制。

(2) 软件生成法。主要有三种基本算法:

1) 自然采样法。自然采样法是在正弦波和三角波的自然交点时刻控制功率开关器件的通断。正弦波在不同相位角时其值不同,因而与三角波相交所得到的脉冲宽度也不同。另外,当正弦波频率变化或幅值变化时,各脉冲宽度也相应变化。要准确生成 SPWM 波形,就应准确地算出正弦波和三角波的交点。

2) 规则采样法。自然采样法是最基本的 SPWM 波形生成法,它可以准确地计算出各功率开关器件的通断时刻,所得的波形很接近正弦波。但是这种方法计算量过大,在实际工程应用的并不多。规则采样法采用锯齿波作为载波,由于锯齿波的一条边是垂直的,因而它和正弦调制波的交点时刻是确定的,所需计算的只是锯齿波斜边和正弦调制波的交点时刻。这样,计算量比自然采样法小得多,但效果却接近自然采样法,因而在工程上得到广泛应用。实际应用较多的还是采用三角波作为载波规则采样法。在自然采样法中,每个脉冲的中点并不和三角波中点(即负峰点)重合。规则采样法则使两者重合,即使每个脉冲的中点都以相应的三角波中点为对称,这样就使计算大为简化。

3) 低次谐波消去法。以消去 PWM 波形中某些主要的低次谐波为目的,通过计算来确定各脉冲的开关时刻,称为低次谐波消去法。在这种方法中,已经不用载波和正弦调制波的比较,但其目的仍是使输出波形尽可能接近正弦波。低次谐波消去法可以很好地消去所指定的低次谐波,但是剩余未消去的较低次谐波的幅值可能会相当大。不过,因为其次数已比所消去的谐波次数高,因而较容易滤除。

上述逆变器拓扑输出离散的波形,对逆变器的应用增加了一些基本条件。电压型逆变器的交流输出电压波形是离散的(du/dt 大),对于感性负载,电流波形虽然得到了平滑,但必然会产生谐波;对于容性负载,则会产生大的尖峰脉冲电流。因此,电压型逆变器的交流侧和负载之间,应使用感性滤波器。电流型逆变器交流输出的电流波形是离散的(di/dt 大),对于容性负载,电压波形虽然得到了平滑,但必然会产生谐波;对于感性负载,则会产生大的尖峰脉冲电压。因此,电流型逆变器的交流侧和负载之间,应使用容性滤波器。

在电压型逆变器中,改善交流输出波形的有效途径是采

用多级拓扑(多单元和多电平),其基本原理是用多种电平的电压构成要求的交流输出波形,从而降低中压交流调速传动波形的 dv/dt 。尽管这些拓扑是由交流调速传动发展起来,但也适用于静态无功补偿、有源滤波和电压补偿,并已发展了一些专门的调制技术来控制这些拓扑中更多的功率开关,其中,基于载波的调制技术(如 SPWM)和空间矢量(SV)调制技术已自然延伸到这些应用之中。

对逆变器的两个最基本的技术要求是输出电压可以调控,输出电压波形中的谐波含量在允许值以内。通过对全控型开关器件的多脉冲 PWM 控制,或 SPWM 控制,或采用电压空间矢量控制都可以由逆变器内部实现输出电压的调控,并使输出电压中的低阶次谐波消失,剩余的高阶次谐波只需较小的滤波器即可滤去大部分高次谐波,使负载电压中的谐波被控制在允许值以下。

船用逆变器输出电压的控制有三种基本方案可供选择:

(1) 可控整流方案。如果电源是交流电源,可通过改变整流器输出到逆变器的直流电压来改变逆变器的输出电压。

(2) 斩波调压方案。如果前级是电池,则可通过直流斩波器改变逆变器的直流输入电压来改变逆变器的输出电压。

(3) 逆变器自身控制方案。仅通过逆变器内部开关器件的脉冲宽度调制(PWM),调控中基波电压的大小、提高输出电压中最低次谐波的阶次、并减小其谐波数值,来达到调控其输出基波电压,同时又改善输出电压波形的目的。逆变器自身调控其输出电压大小和波形是一种先进的控制方案。

采用电压空间矢量控制策略,以微处理器和数字信号处理器 DSP 为基础,可以构成特性优良的逆变器控制系统,改进逆变器的静态和动态特性。

8.1.2 逆变电源的设计

(1) 开关器件的设计。开关器件的设计应遵循以下两个原则:

1) 器件工作时的电压和电流都不应超出其安全工作区(SOA)。IGBT、MOSFET 以及各种二极管都有相应的工作区,这也是其产品手册的重要内容。值得注意的是,开关器件在实际电路中承受的电压和电流都是脉冲的,因此脉冲安全工作区是最有指导意义的。

2) 器件工作时的结温不能超过最大结温。由于半导体在较高的温度条件下会变成导体从而失去电压阻断能力,因此器件工作中管芯的温度——结温不能超过允许值,这一上限同管芯材料和工艺有关。器件工作中都会产生损耗,以热的形式通过器件的壳体散发到周围环境中,传热过程中结——壳间就会形成温差。

在实际设计中,应该计算出开关器件工作时的电压和电流峰值,并根据安全工作区(SOA)来初步选择器件的电压和电流容量,然后根据估算的器件发热功率、最高环境温度和热阻等参数来估算工作时的结温,并应留有裕量。

(2) 热设计。通常对 IGBT 或 IGCT 模块来说,其 PN 结温度不得超过 125°C ,封装外壳温度为 85°C 。有研究表明,若元器件温度波动超过 $\pm 20^{\circ}\text{C}$,其失效率会增大 8 倍。电力电子器件散热设计关系到整个系统的安全运行。在进行电力电子器件散热设计时应注意:

1) 选用耐热性和热稳定性好的元器件和材料,以提高其允许的工作温度。

2) 减小设备器件内部的发热量。为此,应多选用微功耗器件,如低损耗型 IGBT,并在电路设计中尽量减少发热元器件的数量,同时要优化器件的开关频率,以减少器件的

开关损耗。

3) 采用适当的散热方式与冷却方法,降低环境温度,加快散热速度。

在设备稳态运行时,功率单元内整流二极管、IGBT、续流二极管总的功率损耗即为散热器的耗散功率。热设计的第一步就是对上述器件的总功耗进行估算。

(3) 结构设计。机箱结构的设计需要考虑到机械强度、质量、散热、屏蔽、美观、标准化,以及装配、调试、维护是否方便等诸多方面的因素。

从强度方面考虑,机箱结构应有结实的框架和较厚的底板,以承担变压器、电抗器、散热器等的重量,其他侧面的盖板可以用较薄的板以减轻质量。

从屏蔽角度考虑,机箱各盖板和底板间的搭边应有良好的电接触,机箱的开孔应尽量少,辐射电磁波较强的元件应远离开孔。

从调试、维修方便的角度考虑,需要调整的元器件和易损的元器件应比较容易接触到。

对于放置于机柜或屏中的电源,其机箱尺寸还需满足柜和屏的尺寸标准。

散热问题可能是机箱结构设计时考虑最多的问题,需要考虑的主要问题有发热元件的摆放位置、风道的设置、冷却元件的分离等。不过从目前的资料来看,有很多种可行方案,各有其优缺点,很难确定一个最佳方案。

(4) 电磁兼容设计。从对设计任务书的阐述已经知道,电磁兼容性(EMC)包括电磁敏感性(EMS)和电磁干扰(EMI)两方面,因此电磁兼容性也包括两方面的内容,但这又不是绝对的,有些设计内容既关系到 EMS,也关系到 EMI。

作为电磁兼容性设计的基础,首先需要对电磁干扰形成的机理有一定的认识。形成电磁干扰需要三个要素:干扰源、敏感元件和干扰途径。缺少任意一个,都不能形成干扰。

因此,电磁兼容性设计是围绕着降低干扰源的强度、阻塞干扰途径、降低敏感元件敏感度三个中心进行的。

(5) 驱动电路设计。驱动电路是控制电路与主电路的接口,同逆变电源的可靠性、效率等性能密切相关。驱动电路需要有很高的快速性,能提供一定的驱动功率,并具有较高的抗干扰和隔离噪声能力。

驱动信号施加在开关器件的栅极——发射极(IGBT)间,在很多电路拓扑结构中,不同开关器件的发射极间的电位差很大,而且在高速变化,因此驱动电路还要具备隔离功能。

目前常用的驱动电路可以分为以下三类。

1) 变压器隔离驱动电路。该电路结构简单、成本低,隔离电压能达到很高,传输延时很小,而且无需附加电源,适合于较高频率($50\text{kHz}\sim 10\text{MHz}$)电路的驱动。

由于变压器只能传输交流信号,信号的正负伏秒面积必须相等,因此当占空比变化时,驱动信号的正负脉冲幅值也相应变化。而 IGBT 的驱动信号正脉冲幅值必须在 $10\sim 18\text{V}$ 范围内,负脉冲幅值也不能超过 20V ,因此当占空比超过 50% 时,采用变压器隔离驱动就不合适了。

2) 高压集成电路驱动。是一类专用的高压集成电路(HVIC),它采用高速光耦合器件作为隔离传输信号的元件,隔离后的驱动电源采用“电荷泵”的方式,从主电路中取得,不再需要附加电源。这类集成电路的工作频率可达 $500\text{kHz}\sim 1\text{MHz}$,传输延时也很小。但由于 HVIC 技术的局

限,目前只能用于500V以下小容量器件的驱动,而且成本较高,外围电路复杂,可靠性也存在一定的问题。

具有代表性的产品是IR公司的IR2000系列。

3) 厚膜集成驱动电路模块。是一类最适合于大容量逆变电源的驱动电路。这类模块通常是以陶瓷为基板,由贴装元件构成的混合集成电路。电路中采用光耦元件隔离传输信号,可以达到很高的隔离电压。隔离后电路的电源由外部供给,通常需要正负两组电源,以实现正负电平驱动。由于驱动信号的正负电平不随占空比变化,因此占空比可以在0~100%范围内任意变化,工作稳定可靠。

更为可贵的是,这类驱动电路本身都含有基于检测器件通态压降原理的过电流保护电路,可实现有效的保护,这对价格昂贵而且容易损坏的大容量开关器件的使用是非常必要的。

但此类驱动电路也有一些缺点,如需要提供多组隔离的电源,电路复杂,成本高,光耦器件传输延时大,适合开关频率低(<40kHz)等。

8.2 逆变装置的并联运行

当前由高频自关断器件构成的船用逆变电源具有较高的性能,并形成了模块化的结构,但由于单个逆变电源模块的容量较小,为了扩大输出容量需要由多只逆变电源模块并联来运行。

采用逆变电源模块的并联技术带来的优点是:

- (1) 可以灵活扩大逆变系统的容量。
- (2) 易于实现逆变器模块化,组成并联冗余系统,提高运行的可靠性。
- (3) 系统的可维护性强。
- (4) 单台逆变器的功率开关电流应力小。

逆变器的并联与同步发电机的并联存在一定的差异:

- (1) 同步发电机比逆变器有更高的输出阻抗,因而具有下垂特性而自动均流。
- (2) 逆变器不具备同步发电机输出功率时有降低电机转速趋向的功能。
- (3) 同步发电机采用励磁电流控制,动态相应速度较慢,电压控制带宽较窄,而逆变器则具有较高带宽的电压控制特性。
- (4) 同步发电机的联结电缆通常为电感性,而逆变器的互连线通常为电阻性。因此,逆变器的并联运行要比同步发电机的并联运行难。同步发电机并联供电系统,输出电压频率和相位可自同步;而逆变器并联系统不具备这种自同步能力。

逆变器并联时的环流是由于各逆变模块输出电压的瞬时值不相等造成的,为了消除环流,应保持各并联模块输出交流电压的频率、相位、幅值都相同。两台逆变器并联的电路如图3.3-23所示。

由于线路阻抗 R 的值很小,当两台逆变器的输出电压矢量 U_1 、 U_2 在相位幅值上有差异时,即使其电压矢量的差值 $(U_1 - U_2)$ 很小,也会产生较大的环流,此环流不经过

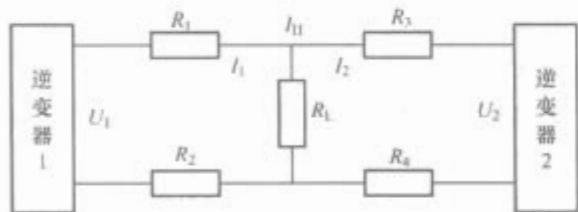


图 3.3-23 两台逆变器的并联

负载而在电源间流动,造成逆变器中功率开关器件的电流增加,损耗增大,对逆变器的可靠运行带来极为不利的影响。

为了减小环流并获得较好的均流效果,各逆变器输出电压的频率及相位可由同步电路来保证。并联逆变系统输出电压的同步原理如图3.3-24所示。在并联控制器中设置一个公共同步基准信号 u^* ,各并联逆变器均能接收该同步信号,并使输出电压跟踪该信号,从而达到各逆变器输出电压同步的目的。输出电压 u_o 跟踪同步信号 u^* 由锁相环电路完成。由于晶振的振荡频率精度很高,并具有良好的稳定性,因此可认为不同逆变器的输出电压频率近似相等,同步的主要任务是使 u_o 与 u^* 的相位一致。



图 3.3-24 并联逆变器输出频率及相位同步原理框图

而并联逆变器的输出电压的控制则要复杂得多,这是由于各逆变器并联的反馈电压是多台电源共同得到的公共电压,而不是各个逆变器各自的输出电压。采用公共电压进行反馈控制后会导致各逆变器输出电流的差别增大。

目前并联逆变技术的均流方式主要有自整步法、功率调节法、同步开关控制法、主从模块法和平均值电流控制法等。

并联逆变技术正朝着高功率密度、高变换效率、大容量、高可靠性、无污染、智能化的方向发展,具体表现在如下几个方面:

- (1) 逆变器并联时无需附加额外控制模块。
- (2) 各并联逆变器模块间无通信线。
- (3) 能实现任意各逆变器模块的并联和 $N+1$ 冗余工作。
- (4) 采用高速数字信号处理器DSP对并联逆变器进行检测、故障诊断、控制、保护及报警,实现负载均流和输出同步。
- (5) 当一个模块出现故障时,第 $N+1$ 个冗余模块能自动接入并联系统取代故障模块,实现热插拔更换,系统可靠性和可维修性高。

9 船用直流静止电源

船用直流静止电源是指采用电力电子变换电路替代传统的直流发电机,将交流电能或直流电能转换为船上用电设备所需直流电源的装置。整流的作用是将交流电能变换成直流电能供给直流用电设备,例如直流电动机,同步发电机的励磁,通信系统的基础电源等。整流电源按控制原理的不同可分为相控整流电源和高频整流电源。当输入电源为交流电源时,该装置称为整流器;当输入电源为直流电源时,该装置称为DC/DC开关电源。

9.1 相控整流电源

以晶闸管作为整流电路中的整流管,通过控制晶闸管门极触发脉冲的相位,即控制触发延迟角 α 的大小来调节直流输出电压的装置叫晶闸管相控整流器,也称为可控整流器。

常用的相控整流电源的结构有:单相桥式整流(半控、

全控, 2 脉波)、三相桥式整流(半控、全控, 6 脉波)等。对于 m 脉波的相控整流, 整流输出电压 U_o 为

$$U_o = \frac{\sqrt{2}U_1}{\pi} m \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \cos\alpha \quad (3.3-9)$$

式中: U_1 为线电压有效值; m 为整流输出电压脉波数; α 为触发延迟角。

图 3.3-25 是典型的三相全控桥式相控整流电路原理图。

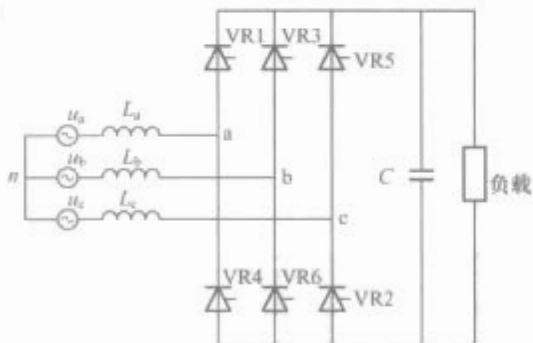


图 3.3-25 三相全控桥式相控整流电路原理图

图 3.3-25 中 VR1、VR3 和 VR5 三个晶闸管按共阴极连接, VR2、VR4 和 VR6 三个晶闸管按共阳极连接。这 6 个晶闸管的触发次序按 VR1—VR2—VR3—VR4—VR5—VR6 的顺序循环进行, 且 6 触发脉冲互差 60° 。为了保证电路的正常工作, 每个晶闸管的触发脉冲宽度须持续 $1/6$ 个电源周期, 或者采用双脉冲触发方式, 即给某个晶闸管发出一个触发脉冲后, 间隔 60° 再补发一个触发脉冲。在三相全控桥式相控整流电路中, 每个晶闸管的最大导通角为 120° , 每隔 60° 就有一个晶闸管换相, 所以其整流输出电压的脉冲频率是电源频率的 6 倍。当每个晶闸管的导通角为 120° (即触发延迟角 $\alpha=0$) 时, 就是三相不可控整流电路, 此时整流输出电压最高。

相控整流电路的优点是:

- (1) 主电路结构简单。相控整流电路可采用电源换流方式, 无需设置独立的关断电路。
- (2) 控制方便, 整流输出直流电压可控, 交流输入电压可较大范围浮动。
- (3) 由于使用较早, 技术成熟, 晶闸管价格便宜, 因而得到广泛应用。

相控整流电路的缺点是:

- (1) 整流器输入电流 i_s 对电网的不良影响。由于 i_s 谐波严重, 谐波电流的存在将降低设备网侧功率因数, 增加无功功率。
- (2) 相控整流在控制角 α 大、整流输出电压低的深控状态时, 整流器的功率因数随 $\cos\alpha$ 的减小急剧减小。
- (3) 由换流过程引起的电网电压波形畸变。由于采用了电源过零点自然换流方式, 导致换向重叠期间电网电压畸变, 其后果不仅是整流器自身性能受到不良影响, 而且也降低电网质量, 产生电网干扰, 对同一接入点的网间其他用电设备带来不良影响。
- (4) 调节快速性差。相控整流电路是一个时滞环节, 使晶闸管相控整流电路无法实现输出电压的快速调节。

但由于晶闸管的电压和电流等级远高于其他电力电子器件, 因此在一些大功率应用场合仍然采用相控整流电源。

9.2 高频整流电源

为了减小整流电路输入端谐波电流造成的严重后果, 以保证电网供电质量, 提高舰船上电网的可靠性, 同时也为了提高输入端功率因数, 必须限制整流电路的输入端谐波电流。而采用高频 PWM 整流可减小电源电流中的谐波电流,

提高功率因数, 满足舰船上用电设备对谐波标准日益严格的要求。

采用高功率因数、低谐波的高频开关模式 PWM 整流器 SMR (Switched Mode Rectifier), 替代传统的晶闸管相控整流装置是大势所趋。和传统整流器相比, SMR 可以控制交流电源电流为畸变很小的正弦化电流, 且功率因数为 1。此外, SMR 和传统相控整流装置相比较, 体积、质量可以大大地减小, 动态响应速度显著提高。

SMR 工作中一般采用全控器件进行高频脉宽调制 PWM 控制, 所以从本质上讲应称为 PWM 整流器。从不同的角度看, PWM 整流器有不同的类型。按是否具有能量回馈功能, 可将 PWM 整流器分成无能量回馈功能的功率因数校正式 (PFC) 整流器和具有能量回馈功能的开关模式整流器 (RSMR)。

RSMR 均采用全控型半导体开关器件, 它比 PFC 电路具有更快的动态响应和更好的输入电流波形。另外, 它还可以把交流输入电流的功率因数控制为任意值, 实现交、直流侧的双向能量流动。在实际应用中, 特别是在中小功率领域, 将二极管与自关断器件反并联成一个可双向导电的开关器件, 在直流侧并联一个大电容构成电压型 PWM 整流器, 是能量可双向流动的高频 PWM 整流器的主流。

按电路的拓扑结构和外特性, PWM 整流器分为电压型 (升压型或 Boost 型) 和电流型 (降压型或 Buck 型)。升压型整流器的基本特点是输出的直流电压高于交流电源线电压峰值, 这是升压型拓扑结构决定的。升压型整流器输出一般呈电压源特性。降压型整流器的基本特点是输出的直流电压总低于交流电源线电压峰值, 这是降压型拓扑结构决定的。降压型整流器输出一般呈电流源特性。

无论哪种 PWM 整流器, 功率因数都基本能达到 1。但在谐波含量、控制复杂性、动态性能、电路体积、质量、成本方面, 这两种整流器有较大差别。

电压型 PWM 整流器稳态工作时, 整流输出电压不变, 开关管按正弦规律作脉宽调制。由于输入电感的滤波作用, 忽略交流侧电压的谐波, 整流器可看作是可控正弦电压源。它与电网的正弦电压共同作用于输入电感 L , 产生正弦输入电流。适当控制整流器交流端的电压 U_i 的幅值和相位, 就可以获得所需大小和相位的输入电流 i_s 。

9.3 DC-DC 开关电源

DC-DC 开关电源是一种由占空比控制的开关电路构成的直流电能变换装置。其功率从零点几瓦到数十千瓦, 舰船及导弹中大量采用了 DC-DC 开关电源。

开关电源技术包括以下重要的组成部分:

- (1) 元器件技术。包括涉及开关器件的电力电子器件技术和涉及变压器、电感等主要磁性元件的磁技术, 以及涉及电容等其他无源元件的技术。
- (2) 电路技术。主要研究各种基本开关电路和相应的软开关电路, 以及各种吸收电路等。
- (3) 控制技术。主要研究适合于开关电源的各种开关控制方法, 如电压模式控制和各种电流模式控制等。
- (4) 电磁兼容技术。研究开关电源中的电磁干扰的产生、传播和抑制等问题。
- (5) 散热技术。利用传热学理论, 分析和解决开关电源主要发热元件的散热问题。

开关电源的分类原则较多, 较常见的有按其是否具备能量回馈能力分类、是否隔离分类和按照其采取的开关电路形

式来分类。

通常并不需要开关电源具备使电能从负载侧回馈到电源侧的能力,因此大多数电源是不能回馈的,然而有些特定的场合,如蓄电池充放电电源,却需要电能能够在电源与负载间双向流动,这时就需要能回馈电能的电源。

按照开关电源的输入与输出间是否电气隔离,可以将其分为非隔离型和隔离型两大类,输入和输出间不具备电气隔离能力的为非隔离型,具备电气隔离能力的为隔离型。值得说明的是,与同等电压、电流、功率的非隔离型开关电源相比,隔离型开关电源的电路较为复杂、效率略低、成本也有所增加。但在实际应用中,仍广泛采用隔离型开关电源,原因如下:

- (1) 负载要求电源的输入端与输出端电气隔离。
- (2) 需要相互隔离的多路输出。
- (3) 输出电压与输入电压的比例远小于1或远大于1。

DC-DC开关电源的核心是电力电子开关电路,根据负载对电源提出的输出稳压或稳流特性的要求,利用反馈控制电路,采用占空比控制方法,对开关电路进行控制。DC-DC开关电源的这一技术特点使其同其他形式的电源,如采用晶闸管的相控电源相比具有两个明显的优点:

(1) 效率高。采用占空比控制的开关电路,在理想情况下,只进行能量的变换而没有损耗。实际上,电路中开关器件存在通态压降、断态漏电流、开关损耗等非理想因素,电感和电容元件也有等效串联电阻和漏电流等非理想因素,所以存在损耗。但电路的总效率仍能达到85%~98%,通常比相控电源的效率要高些。

(2) 体积小、质量轻。DC-DC开关电源采用较高的开关频率,一般高于20kHz这一人耳的听觉极限。因此电路中的L、C等滤波元件和变压器都大为减小。而相控电源通常

都需要采用很大的滤波元件和笨重庞大的变压器。所以在同等功率条件下,开关电源的体积和质量仅为相控电源时的1/10。另外,DC-DC开关电源的效率较高,需要的散热器也较小,这在很大程度上减小了体积和质量。同时,还节省了很多硅钢片、铜、铝等原材料。

因为具有这些优点,DC-DC开关电源的应用越来越广泛,大有取代相控电源的趋势。值得注意的是,由于大功率全控型开关器件以及高频磁性元件的局限,在需要的功率非常大(1MW以上)时,仍需采用相控电源。但随着控制技术和元器件技术的不断发展,DC-DC开关电源的各方面性能都在不断提高,容量也在不断扩大。

目前船用DC-DC开关电源存在的主要问题是:

- (1) 开关过程中产生的损耗限制了开关频率的进一步提高。
- (2) 开关时产生的电磁噪声和输入电流中的谐波会造成较大的电磁污染。
- (3) 控制精度和快速性有待进一步提高。
- (4) 结构复杂,设计和生产需要较高的技术支持,降低成本、提高可靠性有一定难度。

目前船用DC-DC开关电源技术发展的趋势:

(1) 节约空间、能源和原材料的需要,对DC-DC开关电源的体积、质量和效率提出了更加苛刻的要求,促使其向小、轻、薄发展,“功率密度”(单位体积的功率)和效率成为衡量电源性能的重要指标。

(2) 智能控制技术将使的电源更加“聪明”。电源将不仅是提供电能的装置,还将为用电电路提供保护,使其免受电网各种冲击、干扰的破坏,而且要求使用和维护起来更为简单可行。



第4章 船 用 电 池

1 概述

1.1 电池的原理、组成和分类

电池又称化学电源，是一种能量转换装置。它可以将物质的化学能通过电化学反应直接转化为电能输出，也可将电能转换成化学能贮存起来。

电池主要由正电极、负电极、电解质、隔膜、电池槽等部件组成。电极是电池的核心部件，由活性物质和导电支撑骨架组成。活性物质是电池产生电能的源泉，决定电池的基本特性。导电支撑骨架负责集流、承载活性物质或助剂。电解质在电池内回路中负责传递荷电离子，在某些电池中，电解质可起双重作用，它既是离子导体又是活性物质。隔膜位于正负电极之间，既能提供离子导电通道，又能隔离正负电极防止电池内部短路。当电解质为液体时，隔膜为多孔电子绝缘材料。当电解质为固体快离子导体时，可兼有隔膜和电解质的双重功能。电池槽是电池的容器。

电池按其特性大致可分为四类：一次电池（或原电池）、二次电池（或蓄电池）、贮备电池（或激活电池）、燃料电池（或连续电池）。一次电池直接利用活性物质放电产生电能，转换过程不可逆。二次电池的能量转换过程是可逆转的，放电时，将活性物质的化学能转变为电能，充电时，将电能转变为化学能贮存起来。贮备电池在贮存期间是惰性的，可长时间贮存而无自放电，一旦激活条件具备就能一次性地产生电能。燃料电池的特点是活性物质贮存在电池本体之外，只要将活性物质（如燃料和氧化剂）连续注入燃料电池，它就能长期不断地放电。

1.2 电池的主要技术特性

1.2.1 开路电压与工作电压

开路电压是外电路没有电流通过时，正负两电极之间的电位差。一般用 V_{oc} 表示。

工作电压又称负荷电压，是外电路有电流通过时，正负两电极之间的电位差。一般用 V_{oc} 表示。当有电流通过时，因电池内部存在极化而产生电压降，故工作电压总是低于开路电压。

1.2.2 容量

电池容量有理论容量、实际容量、额定容量之分，其单位一般用安时（Ah）表示。

理论容量是假设活性物质的化学能全部转换为电能，再根据活性物质的质量按照法拉第定律计算求得的电量。

实际容量是在一定放电条件下，电池实际放出的电量。

额定容量是按国家或有关部门标准（或合同）规定，在一定放电条件下，电池产品必须保证放出的最低限度的电量。

1.2.3 比能量和比功率

比能量是在一定放电条件下，电池单位质量或单位体积所输出的电能，常称为质量比能（Wh/kg）或体积比能（Wh/L），也称能量密度。比能量有理论比能和实际比能

之分。

比功率是在一定放电条件下，在单位时间内，电池单位质量或单位体积所输出的电能，常称为质量比功率（Wh/kg）或体积比功率（Wh/L），也称功率密度。

1.2.4 蓄电池的循环寿命

当蓄电池在一定充电、放电制度下，反复进行充电——放电循环时，蓄电池容量或某种关键性参数随着循环数增加而降低。循环寿命是蓄电池容量或某种关键性参数下降到规定值之时所耐受的总循环次数。

1.3 电池在船舶中的应用和发展

船用电池作为可移动的独立电源，可为船舶提供多种用途。长期以来，在水面船舶和海洋平台上广泛使用铅酸电池作为起动、照明、通信、应急和 UPS 电源等。锌银蓄电池、铅酸蓄电池已大量用于常规潜艇、核潜艇以及鱼雷、水下机器人等各类海洋航行器中。近年来，随着全电力船的研究、海洋勘探开发、深海作业等技术领域的飞速发展，对电池提出了许多新的需求，如将电池用于发电、推进、电网供电、应急电源、贮能等。在船舶中，电池与传统的热机相比，除了具有高效、清洁、安静、紧凑等特点之外，还可以降低声波、红外、磁场等航迹，并可在舰船各配电区域分散安装，以充分利用舰船内的空间。目前，动力型电池已在特殊舰船上得到开发应用。表 3.4-1 列出了这些新用途对电池的要求。

为适应国民经济发展的需要，电池技术也在飞速发展。除了老产品铅酸电池、锌银电池等在不断改进之外，氢-镍电池、锂离子电池、燃料电池等新型高性能电池不断涌现。表 3.4-2 列出了几种二次电池的主要性能。随着电池技术的进步，它必将在船舶、海洋领域中得到更加广泛地应用。

表 3.4-1 船舶用途对电池功率的要求

船 型		用 途	功率（MW）
水 面 军民船		推 进	5~50
		电网供电	<10
		应急电源	0.1~1
水 下 军民船	潜 艇	单一推进	2~5
		应急电源	0.5~1
	鱼 雷	推进	0.2~0.4
	水下机器人	推进	0.01~0.2
	小型航行器	推进	≤0.01

表 3.4-2 常见二次电池的主要性能

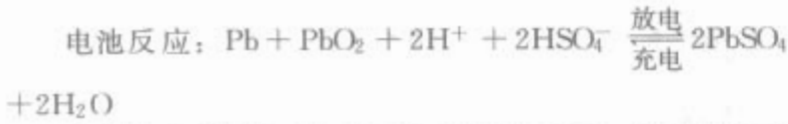
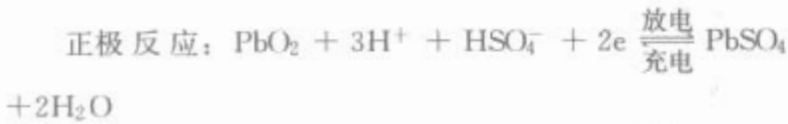
电池类型	铅酸电池	锌银电池	镉镍电池	氢-镍电 池	锂离子电 池
工作电压（V）	2.0	1.5	1.2	1.2	3.6
质量比能（Wh/kg）	30~50	100~120	40~50	70~90	120~150
体积比能（Wh/L）	100~150	180~220	100~150	200~300	300~400
比功率（W/kg）	150~200	200~350	80~150	≥300	200~300
循环寿命（周）	300~800	≥100	≥500	≥500	≥1000

2 船用铅酸电池

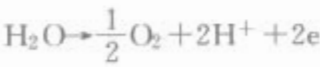
铅酸电池 1859 年由普兰特 (G. plante) 发明,是最先得到应用的二次电池。由于具有价格低廉,原料易得,使用可靠,又可大电流放电等优点,因此铅酸电池一直是化学电源中产量大应用范围广的产品。在船用动力电源中,潜艇用铅酸蓄电池是其中规模最大、技术最成熟的实用电源。

2.1 原理及特性

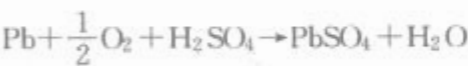
铅酸电池的电化学表达式为



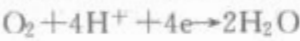
密封铅酸电池的工作原理除上述电极反应,即成流和蓄电反应外,还有内部氧循环过程。电池充电过程中,当正极板的荷电状态达 70%左右时,水开始分解



产生的氧气通过隔板扩散到负极,与海绵铅反应



同时,氧气在负极上还可能发生电化学还原反应



此即内部氧循环过程,通过该过程,密封电池内不会积累氧气,负极一直处于充电不足状态,不会析出氢气。

铅酸电池的主要特性见表 3.4-3。

表 3.4-3 铅酸电池的主要特性

正极 活性物质	负极 活性物质	工作电压 (V)	理论比能 (Wh/kg)	实际比能 (Wh/kg)	寿命 (周)
PbO ₂	Pb	2.0	170	30~45	>300

铅酸电池单体主要由正极板、负极板、硫酸电解液、隔板、电池槽组成。正负极分别焊成极群。正负极浸在一定浓度的硫酸溶液中,隔板将正负极隔开,需具备足够的孔率和孔径,一般为橡胶、塑料、玻璃纤维等电子绝缘体。密封式电池的隔板还必须具有吸酸能力强,可压缩,有利于氧气扩散等功能。硫酸在电池中既传导电流,也参加电池反应,随着放电的进行,硫酸不断减少,同时有水生成,电池中电解液浓度不断降低。反之,在充电时,硫酸不断生成,电解液浓度不断增加。电池槽也应为电绝缘体,要求耐酸、耐温范围宽,机械强度高。

2.2 分类及选型

铅酸电池在船用领域主要用途为通信、照明、起动、应急和电力推进等。

与船用电池相关的字母含义见表 3.4-4。

表 3.4-4 与船用铅酸电池有关的字母的含义

汉语拼音字母		含 义	汉语拼音字母		含 义
表示 电池用途 的字母	Q	起动用	表示 电池特征 的字母	A	干荷电式
	G	固定用		M	密封式
	JC	舰船用		FM	阀控式
	QT	潜艇用		W	无需维护
	CQ	船舶起动用		G	管式正极板
	CT	船舶通信、照明用		H	湿荷式

船用通信、照明和起动用铅酸电池型号较多,此处仅列出几种型号以供参考(见表 3.4-5、表 3.4-6),详情可查阅相关标准。

表 3.4-5 船舶通信、照明用铅酸电池型号示例

型号	额定电压 (V)	额定容量 (Ah)		最大外形尺寸 (mm)			
		10 小时率	1 小时率	长	宽	槽高	总高
CT-50	2	50	25	135	146	270	307
CT-350		350	175	248	193	421	478
CT-600		600	300	315	193	421	478
CTM-200		200	130	108	173	330	365
CTM-500		500	325	242	173	330	365

表 3.4-6 船舶起动用铅酸电池型号示例

型号	串连 的单元 个数	额定 电压 (V)	20 小时 率额定 容量 (Ah)	储备 容量 (min)	起动 电流 (A)	最大外形尺寸 (mm)					
						橡胶槽			塑料槽		
						长	宽	高	长	宽	高
3-CQ-75	3	6	75	123	300	197	178	261	190	170	245
3-CQ-135	3	6	135	260	435	305	178	261	305	175	245
6-CQ-90	6	12	90	154	315	427	178	261	380	177	235
6-CQ-165	6	12	165	342	495	517	252	250	513	223	260
6-CQ-210	6	12	210	450	630	517	296	250	521	278	270

国外常规潜艇电力推进用铅酸电池的基本参数见表 3.4-7。我国常规潜艇铅酸电池的基本参数、性能均与国外先进电池相仿。

表 3.4-7 国外潜艇用铅酸电池基本参数

国别	型 号	额 定 电 压 (V)	1 小时率 额定容量 (Ah)	质 量 (kg)	外形尺寸 (mm)		
					长	宽	高
德国	21UR9EF	2	9495 ^①	615	456	360	1280
希腊	SUNLIGHT		5850	518	450	290	1410
法国	AGOSTA		5000	520	450	360	1069
英国	55KR189		7500	1076	656	365	1076

① 1.5 小时率放电方式。

此外,铅酸电池也可按极板结构分为涂膏式、管式和形成式;按荷电状态分为干放电态、干荷电态、带液充电态、湿荷电态、免维护铅蓄电池和少维护铅蓄电池;按电池盖和排气栓结构分为开口式、排气式、防酸隔爆式、防酸消氢式和阀控密封式。但总的来说,铅酸电池按工艺特点可分为富液式和密封式两大类。

2.3 设计与制造

2.3.1 设计步骤

在设计新产品时,需根据产品总的技术要求,按照电池

设计的通用规范,结合专业知识经验,先进行非定型设计。据此做出样品,经检测和现场考核后取得数据,最后对初始设计进行必要的修改完善。铅酸电池一般的设计步骤如下:

(1) 根据用电设备的功率和工作时间的要求,计算蓄电池所必须提供的能量,再决定电池组所包含的单体电池的数目和容量。

(2) 计算单电池的正、负电极数目及其相关参数,设计板栅的尺寸和结构。

(3) 计算单电池容量和正、负极活性物质的用量。

(4) 确定电解液的浓度和数量。

(5) 设计极群组参数、装配比、隔板以及蓄电池槽等。

2.3.2 容量计算

铅酸电池形式多样,各型电池设计有其特性,但总原则是必须将满足于一定容量的铅膏量填满在一定尺寸的板栅中。

密封式铅酸电池在设计上限制正极容量,而负极活性物质容量过剩,以保证充电时正极上优先析出氧气,而负极不产生氢气。

容量计算一般有三种方法:

(1) 阿伦脱经验式

$$C_{10} = 0.154bh\sqrt{\delta} \quad (3.4-1)$$

式中: C_{10} 为极板 10 小时率容量, Ah; b 为极板宽度, cm; h 为极板高度, cm; δ 为极板厚度, cm; 0.154 为常数,当采用单位为 mm 时,常数为 4.87×10^{-4} 。

(2) 活性物质利用率。根据活性物质利用率和极板单位长度上平均电压降损失不得超过某限定值 $\Delta U/\text{cm}$ 进行容量计算。设计时的已知条件为:极板高/宽比值、极板的厚度、某时率放电时活性物质利用率,设计时以正极为准。设计时以物质的体积平衡来进行,即板栅材料的体积加活性物质的表观体积恒等于极板的高度、宽度、厚度三者的乘积。

此法的适用范围:外形尺寸不限,但要求宽、高比例给定;要求给定单位极板长度上的电压降值。

(3) 按铅膏方程确定极板尺寸及活性物质数量计算容量。此法的设计原则与(2)相同,但铅膏体积按铅膏常数计算。

2.3.3 电解液的浓度和用量

硫酸溶液电导率的最大值大约在 30% 左右。电池放电时消耗硫酸同时有水生成,即在放电过程中 H_2SO_4 浓度逐渐降低,而放电终了也不能使 H_2SO_4 浓度降至零,所以 H_2SO_4 浓度一般选在 36%~38% 以上,即 10mL/(Ah) 以上。

2.3.4 制造工艺

涂膏式铅酸蓄电池制造工艺流程如图 3.4-1,基本工序有:板栅制造,正、负极铅膏制造,极板固化,极板化成,电池装配等。

2.4 使用和维护

2.4.1 初充电

各型铅酸电池在出厂时都规定灌注的硫酸密度。电池按规定灌酸后,进行初充电。初充电电流一般用 10 小时率或 20 小时率电流,进行定电流充电。充电中如果液温超过 45℃,应减小电流或暂停充电一段时间。

2.4.2 电池在使用过程中的充电方法

电池在使用过程中,应根据电池类型和使用要求,选择不同的充电方法进行充电。

(1) 正常充电,经初充电的电池在使用过程中的充电称正常充电。

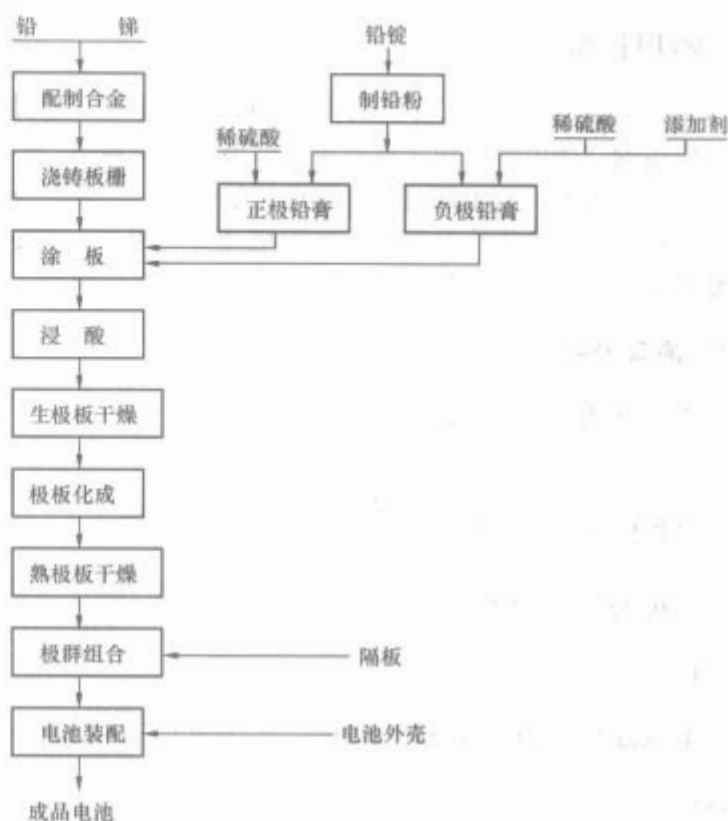


图 3.4-1 铅酸蓄电池制造工艺流程图

(2) 均衡充电,均衡充电可防止单体电池间的密度、电容量、电压等不均匀现象。均衡充电是用小电流进行 1~3h 的过充电。

(3) 快速充电,快速充电电流为正常充电电流的两倍,当单体电池电压升到 2.4V 左右时,应改为正常充电的电流充足为止。

(4) 恒压充电,充电过程保持电源电压恒定,一般控制单体电池电压 2.5V。恒压充电可避免过充电,操作简单。

(5) 浮充电,将蓄电池和整流设备并安在负载回路上,只要蓄电池电压低于直流供电外电源,外电源就给蓄电池充电,当停电或整流设备出故障时,启用蓄电池对负荷供电。

2.4.3 电池维护

为保持电池容量和延长电池寿命,应合理使用和正确维护,一般应做到:

(1) 电池应经常处于充足电状态。充电不足的电池应充足电后再使用。使用过程中应避免大电流充电、过充电和过放电。

(2) 电池全放电后,应在 24h 内进行充电。

(3) 富液电池必须经常对电池加水维护,使电池极板保持在电解液中。

2.5 应用和发展

经过一个多世纪的发展,铅酸电池在材料、设计和生产上取得了很大进步,产品应用几乎涉及各个领域。尽管近年来涌现出多种其他新型高能电池,但作为化学电源来说,铅酸蓄电池以其安全可靠、大规模组合特性好、可以完全回收、价格低廉等综合优势在二次电池市场的份额仍占绝对优势。

在铁路、通信、电力、船舶等诸多领域,铅酸蓄电池作为起动、固定、牵引、备用等电源仍然是化学电源的主力军。尤其是在潜艇领域,铅酸蓄电池至今还未被其他化学电源所取代,仍然是常规潜艇水下的主动力源,也是核潜艇的应急备用电源,英国最新型号的 DSRV(深潜救生艇) LR7 上装备的主动力电池仍然是 CHLORIDE 公司生产的铅酸蓄电池。

为了满足各种使用条件下更加苛刻的要求，也为了迎接新型电池的挑战，对铅酸蓄电池提出了更高的技术要求，如进一步加大容量、提高比能；减少析氢、减少酸雾；实现少维护（或免维护）；延长电池使用寿命，降低费效比；提高安全性、可靠性；更耐冲击、震动。

3 船用锌-氧化银电池

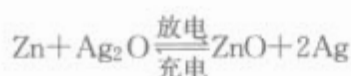
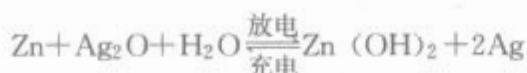
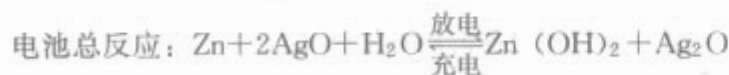
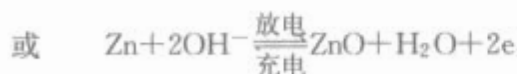
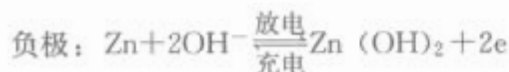
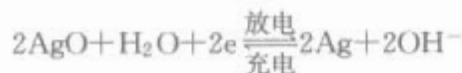
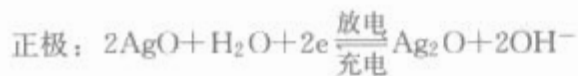
3.1 工作原理

1883 年克拉克（Clarke）提出了锌—氧化银电池的概念，至 1941 年亨利·安德烈（H·Andre）发表了较为全面的论文，从此，锌—氧化银电池进入到商业化实用阶段。

锌—氧化银电池以氧化银（AgO 和 Ag₂O）为正极（+），锌（Zn）为负极（-），氢氧化钾为电解液，其构成可用以下电化式表达



锌—氧化银电池是一种广泛使用的高比能量、高比功率的电池。它既可做成可充电式的二次电池，也可做成贮备式的一次电池。充放电时，其电化学反应原理如下



电池放电时正极活性物质还原，由于其中 AgO 转换成 Ag₂O 的电极电动势与 Ag₂O 转换成 Ag 的电极电动势不同，因此锌—氧化银电池的放电曲线上出现高低两个电压平阶。在实际应用中高阶电压（E₁）为 1.7V 左右，低阶电压（E₂）为 1.5V 左右，在高倍率放电或有特殊添加剂时高电压平阶可以部分减少，甚至消失。

电池放电时负极活性物质氧化，虽然，锌负极的放电产物为 ZnO 和 Zn（OH）₂ 两种，但两者的电极电动势差别不大，因此不会造成电池电压的差异。

3.2 组成和结构

动力型锌—氧化银电池按其特点可分为二次电池和一次贮备电池两种。二次电池可以反复进行充电、放电循环使用。一次电池平时以充电态形式贮存备用，一旦需要，可注入电解液快速激活投入放电使用。

锌—氧化银电池组由多个单体电池串并联组合而成，各单体电池组成元件相同。二次电池多为方形结构，其构件主要包括锌电极（负极）、氧化银电极（正极）、组合隔膜、氢氧化钾电解液、电池槽和盖等（见示意图 3.4-2）。贮备型一次电池多采取压滤式结构，其构件主要为锌—氧

化银双极性电极、隔膜、端板、电解液及其贮槽、激活和控制系统等。

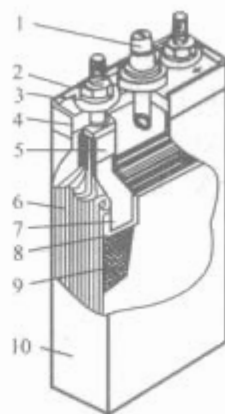


图 3.4-2 锌银电池结构

1—气塞；2—螺母；3—垫圈；4—电
池盖；5—极柱；6—隔膜；7—负极；
8—正极；9—集流网；10—电池槽

3.3 工作特性

锌—氧化银电池是技术成熟的、广泛应用的、性能优良的电池。其特点为：

（1）工作电压和实际比能高。作为二次电池使用时，其工作电压为 1.5V 或 1.7V，质量比能可达 100~150 W·h/kg，体积比能可达 150~240W·h/L。在海洋和船舶应用中，对电池的质量和体积都有严格限制。因此，锌—氧化银电池的高电压、高比能特性十分有利于它在船舶领域中推广应用。锌—氧化银电池在不同放电倍率下的放电曲线存在高低两个电压坪阶，在高倍率下放电时高电压坪阶基本消失。典型的充放电曲线见图 3.4-3。

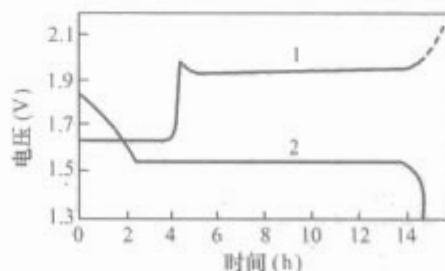


图 3.4-3 锌银电池典型的充放电曲线

1—充电曲线；2—放电曲线

（2）高速率放电特性好。锌—氧化银电池内阻小、极化低，能以很高的放电倍率进行放电。比如，作为鱼雷动力用时，它可在 10C 以上的倍率下进行放电，不仅放电电压平稳，而且电压高、能量效率高。通常在室温下，锌—氧化银电池以 1C 倍率放电时，可放出约 90% 的额定容量，在 3C 倍率下还能放出约 70% 的额定容量。

（3）技术成熟可靠、安全性好。作为动力电池，在海洋、船舶、航天、航空等领域的应用中，首先必须要十分安全可靠。锌—氧化银电池经多年研究开发，技术成熟、工艺稳定、产品可靠。因此，被广泛用作各种潜器、鱼雷、卫星、导弹等的主动电源、应急电源、起动机点火电源、贮能单元。

3.4 使用和维护

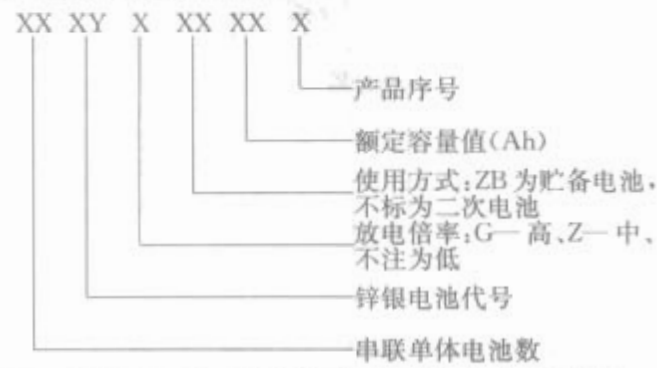
3.4.1 选型和使用

因为价格原因，锌—氧化银电池多用于特殊场合或军事领域，在舰船中主要用于动力系统、控制系统、遥测系统、安全系统等。一般额定容量大于 90Ah 的电池用于鱼雷和潜

器的动力，小于 90Ah 的电池用于导弹、火箭、航空航天等装备中。深海救生、测量等潜器可选用耐压力型充油电池或压力平衡型电池。

产品选型主要内容包括：产品代号、额定容量、外形尺寸、质量、激活方式与时间等。

产品型号编制原则如下：



锌—氧化银电池也可按使用时的放电速率划分为：高倍率电池、中倍率和低倍率三种形式。一般按表 3.4-8 选定各放电速率下的放电电流和终止电压。表 3.4-9 列出了国产常见锌银电池的种类和规格。

表 3.4-8 锌银电池典型放电参数

放电类别	高倍率	中倍率	低倍率
放电倍率	3C、5C、7C ^①	0.2C、2C	0.05C、0.1C
终止电压(V)	1.2	1.3	1.4
工作温度(℃)	20~30		

① C 为锌—氧化银电池的额定容量的数值。

表 3.4-9 锌银蓄电池常见品种和规格

型号	额定电压(V)	额定容量(Ah)	最大外形尺寸(mm)			质量(kg)	备注
			长	宽	高		
XY20	1.5	20	40.5	39.0	120	0.36	低倍率 电池
XY60	1.5	60	56.0	52.0	158	0.90	
XY100	1.5	100	80.5	47.5	183	1.50	
XY125	1.5	125	80.0	50.6	237	2.10	
XY150	1.5	150	80.0	50.6	237	2.18	
XY230	1.5	230	91.0	61.5	314	3.40	
XY300	1.5	300	138	56.5	256	4.09	
XY600	1.5	600	118	100	445	10.50	高倍率 电池
XYG20	1.5	20	64	27	120	0.37	
XYG55	1.5	55	56.5	53.0	174.5	0.98	
XYG85	1.5	85	80.5	47.5	183	1.45	
XYG120	1.5	120	80	68	184	1.90	
XYG170	1.5	170	89.5	62	312	3.40	
XYG200	1.5	200	91	61.5	314	3.70	中倍率 电池
XYZ5	1.5	5	46	33	81	0.22	
XYZ8	1.5	8	40	38.5	120	0.38	
XYZ25	1.5	25	64	28	121	0.42	充油 电池
XY230 ^①	1.5	230	91.0	64	365	3.70	
XY600 ^①	1.5	600	121	103	403	10.50	
XY800 ^①	1.5	800	115	98	540	12.80	
XY1100 ^①	1.5	1100	147	138	420	15.30	

① 深海用耐压充油电池。

3.4.2 一般维护

正确地维护电池可以保证电池组的容量、延长蓄电池组

的寿命以及安全可靠地使用电池。锌银电池组的日常维护操作主要为：

(1) 按规定的制度给蓄电池组充放电，可以选用：正常充电、补充充电、浮充充电和均衡充电等方法。定期检查单电池的电压，单体电池的开路电压和蓄电池的荷电态的对应关系大致如表 3.4-10。若电池组中个别电池的开路电压明显低于同组其他电池时，应用同型号的备用电池替换。

表 3.4-10 锌银电池荷电状态与开路电压的关系

开路电压(V)	≥1.85	1.60~1.84	≤1.59
荷电状态(%)	≥90	50~90	≤50

(2) 检查调整电解液面高度，在维护放电和充电结束后检查液面高度，如不够可用规定浓度的电解液调整。

(3) 检查蓄电池组对地绝缘电阻，如果小于规定值则应该彻底清洁单体电池表面、清洁连接条并检查各蓄电池密封状况。

(4) 检查蓄电池舱内氢气的浓度，定期开启通风装置，保持通风良好，保证蓄电池安全工作。氢气的安全浓度为 2% 以下，浓度大于 1% 时不得充电。

3.5 应用和发展

为满足舰船应用和发展的需要，锌—氧化银电池技术一直在不断改进。它的主要缺点是循环寿命和湿搁置寿命短、高低温性能差、价格贵。二次锌—氧化银电池在充放电循环过程中，由于锌电极形变、枝晶短路、银迁移、隔膜氧化降解等原因使电池循环寿命缩短。一般，锌—氧化银电池的循环寿命在 100~150 周期之间，是常见动力电池中最差的一种。

锌—氧化银电池的高低温性能较差，在 -20℃ 下以中等倍率放电时，电池只能输出 50% 的额定容量。而当温度高于 60℃ 时，由于锌电极自放电增加及隔膜腐蚀加速，电池的寿命会降低很多。

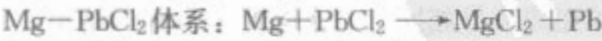
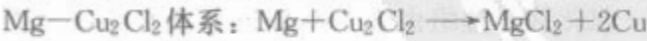
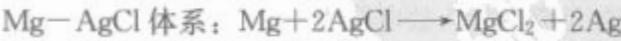
锌—氧化银电池在技术上主要的改进方向是延长循环寿命和湿搁置寿命。其主要措施为：研制新型隔膜材料，提高隔膜的抗氧化能力、抗枝晶穿透能力；防止锌电极形变、抑制锌枝晶生长；研制低汞或无汞的锌电极缓蚀剂。此外，改进一次电池的结构和系统，进一步提高其高倍率放电比能和比功率也很有意义。

4 船用水激活电池

水激活电池是一次性储备电池，在海洋中应用时一般用海水激活，这时也称为海水电池。使用前干态式储存，工作时让海水进入电池，电池很快建立起电压，即可对负载供电。它具有储存寿命长，低温性能好，比能量、比功率高，特别适合于在海洋环境（如船舶和海洋工程）中使用。

4.1 工作原理和分类

海水电池有很多种，它们的原理类似，主要区别在于所用的正、负极材料不同。总的说来，海水电池的化学原理比较简单，常用的几种电池的成流反应如下



上述各电化学体系中，负极上都有一个重要的副反应



式中：Me 为金属负极。副反应析出氢气和放出热量 Q。氢气析出有利于电极表面反应产物（氢氧化物）及时剥离和促进电解液流动；放出热量使电池具有良好的低温放电性能。但副反应也造成电池的电流效率下降。另外，镁、铝电极成流反应也放出热量。

根据激活方式的不同，海水电池可分为三类：

(1) 以海水为电解液的电池，如前述的 Mg-AgCl 电池、Mg-Cu₂Cl₂ 电池、Mg-PbCl₂ 电池。这类电池是最常见的海水电池，其中，Mg-PbCl₂ 电池适合做成小型电池，而 Mg-AgCl 电池、Mg-Cu₂Cl₂ 电池则适合做成动力型电池。Mg-AgCl 电池、Mg-Cu₂Cl₂ 电池的性能比较如表 3.4-11。

表 3.4-11 Mg-AgCl 电池、Mg-Cu₂Cl₂ 电池的性能比较

电池系列	电流密度 (mA/cm)	工作时间 (min)	激活时间 (s)	单体电压 (V)	比能 (W·h/kg)
Mg-AgCl	300~400	6~7	7	1.0~1.2	110~130
Mg-Cu ₂ Cl ₂	600	10	5	0.9~1.0	~150

其中，以 Mg-AgCl 电池广泛应用于鱼雷动力，具体情况如表 3.4-12。

表 3.4-12 Mg-AgCl 电池的应用

国家	鱼雷型号	航速 (kn)	航程 (m)	航深 (m)	功率 (kW)	质量 (kg)
美国	MK45	40	10 000	—	167	238
南非	A44	32	6000	500	—	—
意大利	A244/S	38	13 500	600	—	34
英国	Sting Ray	45	8000	800	65	267
日本	73	40	6000	450	54	40

Mg-Cu₂Cl₂ 鱼雷动力电池只有俄罗斯和美国有应用和研究。

(2) 以海水或水为溶剂的电池，如 Al-AgO 电池，它的理论比能高达 1000Wh/kg，大约是 Mg-AgCl 电池的 2 倍，被认为是 21 世纪具有很大发展潜力的现代鱼雷动力电池。该电池的性能特点是：

- 1) 单体电池电压较高，为 1.5~1.7V。
- 2) 电流密度是锌银电池的 2~3 倍，达到 600~1000mA/cm。
- 3) 电池实际比能达到 150~160W·h/kg。
- 4) 电池放电平稳。
- 5) 电池需自带电解质，并配备初始电解液混合及浓度控制装置，因此辅助系统复杂，其工程技术问题需要进一步解决。

Al-AgO 电池的应用情况如表 3.4-13。

表 3.4-13 Al-AgO 电池的应用

国家和地区	鱼雷型号	航速(kn)	航程(m)	航深(m)	功率(kW)
韩国	蓝鲨	45	—	—	—
意大利	A290	57	10 000	—	100
意大利	黑鲨	50	50 000	—	—
欧洲	MU90	50	25 000	1000	120
法国	海鳐	38~53	9500	1000	100
德国	DM2A4	50	50 000	—	275

(3) 正极活性物质和溶剂是海水的电池。如铝—空气—海水电池。

4.2 组成、结构及性能特点

海水电池由正、负两极、隔膜和引线组成，利用海水为电池激活介质。

海水电池是在激活时注入激活介质海水。根据海水的进液和液流方式，一般将海水电池分作浸没型、浸润型、自流型和控流型四种。

(1) 浸没型。电池工作时完全浸没在电解液中，正、负极间夹一层隔离物，电极堆有叠片状和卷绕形两种。叠片状电极堆的电极隔离物采用绝缘条或多孔性波纹塑料片。卷绕形电极堆的隔离物使用脱脂棉线。

这类电池放电电流可达 50A，放电电压 1V 到数百伏，放电时间从几秒到几天。

(2) 浸润型。在电池正、负极间夹一层隔膜，起绝缘和吸蓄足够的电解液的作用。电池贮存在密封袋中，使用时除去包装，在水中浸泡数分钟，即可使用。此类电池放电电流可达到 10A，产生 30V 电压，放电时间 0.5~15h。

(3) 自流型。这类电池是作为鱼雷动力电源设计的。利用鱼雷的运动迫使海水在电池中不断流动。此类电池的电极隔离物是细小绝缘柱或玻璃珠，使海水流动快而均匀，正、负极距离小，电极堆强度高，保证电池的 pH 值、温度处在一个稳定的条件下工作。电池组由几百只单体电池组成，功率 25~400kW，电流密度达 500mA/cm²，比能量达 90W·h/kg，放电时间 5~5min。

(4) 控流型。在自流基础上设计成的控流型结构，增加了海水循环控制系统（如图 3.4-4），提高了电池放电电流和电压的稳定性，也能适当控制电池温度的变化，提高电池比能量。

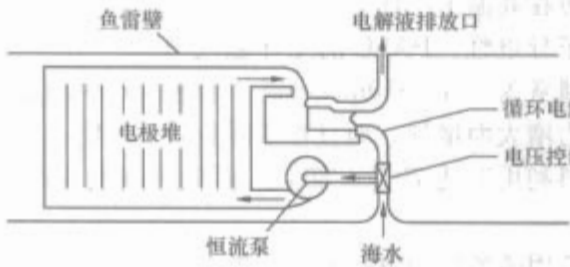


图 3.4-4 控流型电池结构

一般小型电池采用浸没型和浸润型结构，而大型电池采用自流型和控流型结构，如 Mg-AgCl 鱼雷电池为自流型结构，Al-AgO 电池为控流型结构。

4.3 应用和发展

小型海水电池可以作为浮标、探空气球、航标灯、应急灯、海上救难信号灯电源、沉船 GPS 电源、水中电子设备电源和保温式救生衣电源等。大型电池主要作为鱼雷动力电源，未来还可以设计成 UUV 用动力电源。

海水电池比能量高、发电量受外界影响小。它的组合电源可由海水电池和电子升压控制电路组成，该电源还可采用单节敞口式海水电池，在陆地上可以长期贮存而不必担心失效。在海水中不会受海水的压力而损坏。由于电池可采用单节结构，电子电路全部密封，所以结构简单，使用安全可靠，是深海作业电子设备的理想电源，如智能深潜器动力电源、海底油井的自动控制系统电源等。

另外，海水电池的技术还在发展之中，电池正、负极材料是研究的重点，其中最有希望的是用金属锂代替镁或铝作

电池的负极,这样,电池的比能和比功率会有进一步的提高。

5 船用燃料电池

5.1 燃料电池的原理及分类

燃料电池是将燃料和氧化剂的化学能直接转化为电能的特殊电化学装置。电池由燃料负极、氧正极、电解质以及催化剂等组成,当以 H_2 为燃料时, H_2 在负极氧化并失去电子变成 H^+ , 通过电解质迁移到正极; O_2 在正极得到电子还原变成 O^{2-} , 与 H^+ 结合生成 H_2O , 电池则向外电路供给电流。电池反应为: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ 。

相比于一次电池容量有限和二次电池需要充电而不能连续工作,燃料电池有其独特的优点,只要将燃料和氧化剂源源不断地供给燃料电池系统,就能产生不间断的电能,而且比功率高,功率范围广。较之热机,燃料电池具有燃料利用率高、能量转换效率高、噪声低和接近零排放等特点。燃料电池使用的燃料非常广泛,从 H_2 、 CO 、 NH_3 到天然气、石油、甲醇、乙醇、煤气到葡萄糖、碳水化合物、尿素等生物原料。

燃料电池按电解质不同可分为:碱性燃料电池(AFC)、质子交换膜燃料电池(PEMFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)和磷酸盐燃料电池(PAFC)。此外还有可再生燃料电池和半燃料电池。

(1) 碱性燃料电池(AFC)。使用 KOH 溶液作为电解质。以纯氢为燃料,也可以用 NH_3 、肼、乙二醇等作为燃料,AFC的工作温度为 $60 \sim 90^\circ C$, 电池单元结构较简单,因而得以较早成功开发。

其缺点主要是电解质的碳酸盐化和效率较低。

(2) 磷酸燃料电池(PAFC)。使用磷酸作为电解质。优点在于:可在高温下工作,耐 CO_2 , 高的氧溶解度;高温下良好的离子导电性。PAFC的工作温度范围在 $150 \sim 210^\circ C$ 。电流密度通常为 $150 \sim 350 mA/cm^2$ 。电池的效率随温度升高和气体压力增大而增加,而且在实际负荷下,能获得更高的效率。燃料利用率达 $70\% \sim 80\%$, 而氧化剂利用率在 $50\% \sim 60\%$ 。

由于使用磷酸作为电解质,电极酸涌和酸损失也成为影响电池性能和寿命的重要因素。

(3) 熔融碳酸盐型燃料电池(MCFC)。采用 Li 、 Na 、 K 的碳酸盐作为电解质,工作温度为 $600 \sim 650^\circ C$ 。电解质结构的制作方法有热压法、带铸法、电泳沉积法。较先进的带铸和电泳沉积法可以有效地将电解质吸附在基质范围内,保证其在高温状态下最大限度地发挥离子导电作用。

MCFC的另一个特点是对天然气、甲醇、丙烷、煤气等燃料的多种重整方式。它可以使用外部重整器,也可以使用间接内部重整和直接内部重整,重整反应在电池堆内借助于电极反应的温度和热能完成,均可达到较高的转化率。

(4) 固体氧化物燃料电池(SOFC)。SOFC使用固体氧化物如 ZrO_2 、 CaO 、 Y_2O_3 等作为电解质。通常是将这些物质按需要的组分和比例混合烧结成陶瓷组件安装成管式或板式的燃料电池。其工作温度必须达到 $800 \sim 1000^\circ C$, 才能使这些固体氧化物发挥其良好的导电性、气体渗透性和催化作用。

由于该型燃料电池工作温度太高,对高温密封材料和电

池工艺要求都很高,目前国内外均处于研究阶段。各种报道中输出功率密度从 $0.1 \sim 0.4 W/cm^2$ 不等。SOFC 还需经过不断研究发展,才能达到大功率实用水平。

(5) 质子交换膜燃料电池(PEMFC)。PEMFC的电解质是固体聚合物膜。这种电解质具有离子交换功能,它不传导电子,而是 H^+ 的优良导体,又称质子交换膜(PEM)。PEMFC消除了电解液的流动性,又能在 $100^\circ C$ 左右工作,安全可靠。随着电解质膜工艺的不断改进,电池性能不断提高。特别是杜邦公司研制出名叫 Nafion 的聚四氟乙烯磺酸膜,其优良的性能使 PEMFC 达到了全新的水平,取得了更高的电流密度和比功率,应用也日渐广泛和实际。

PEMFC的工艺相对简单,通常将质子膜和载有催化剂的载体组合成膜三合一电极,增强了催化剂与膜的接触,可采用石墨、导电塑料、金属作集流板,加上不锈钢板紧固起来,即可组成一个基本的单元 PEMFC 本体。多个单元串联,采用双极板结构,配之以气体供应、循环、增湿、散热、控制系统,即可组成一定功率的燃料电池系统。它无腐蚀,寿命长,功率密度高。实验电池的电流密度从 $500 \sim 1650 mA/cm^2$, 功率密度从 $0.35 \sim 0.82 W/cm^2$, 比功率达 $1.2 kW/L$ 和 $700 W/kg$, 是所有燃料电池中性能指标最高的,而实用电池组功率已达几百千瓦。

(6) 可再生燃料电池。氢氧燃料电池的产物是水,如果充电加以电解,水又生成氢和氧,则不用再添加氢和氧,燃料电池又可以放电使用,这样就形成了可以循环利用氢和氧的燃料电池,就是可再生燃料电池。目前处于实验室研究阶段。

(7) 半燃料电池。半燃料电池又叫金属空气电池,它的负极材料为金属,如铝、锌等,正极为空气或氧气。铝空气电池的负极是铝合金,在电池放电时被不断消耗,并生成 $Al(OH)_3$; 正极是多孔性氧电极,跟氢氧燃料电池的氧电极相同,电池放电时,从外界进入电极的氧(空气)发生电化学反应,生成 OH^- 。电解液可分为两种,其一为中性溶液($NaCl$ 或 NH_4Cl 水溶液或海水),另一种是碱性溶液。比能量高,电池理论比能量可达 $2290 Wh/kg$, 目前实际上已经达到 $300 \sim 400 Wh/kg$ 。锌空气电池具有很高的瞬时输出功率和很稳定的放电电压等众多优点。

5.2 燃料电池在船舶上的应用前景

5.2.1 燃料电池在潜艇 AIP 系统中应用的基本情况

AIP 系统就是在常规潜艇的蓄电池组和柴油发电机组的基础上再添加一个不依赖空气的推进装置,以增加潜艇的续航能力和机动性。AIP 发展以来的 60 多年中先后使用了闭式循环柴油机、斯特林发动机、林肯透平机、燃料电池和核堆等装置。

AIP 系统采用燃料电池是基于其诸多优点。首先,燃料电池可直接输出电能而无需转换,噪声低和接近零排放,有较高的燃料利用率和能量转化率($50\% \sim 80\%$);其次,燃料电池与铅酸蓄电池及镉镍、锌锰、镍氢等电池相比,有较高的比能和比功率,不需要充电,而只要补充燃料和氧化剂;而相比于锂电池,其功率范围要大得多。

燃料电池 AIP 系统的潜艇已有实例。最著名的就是德国海军的 U 系列潜艇。其中 U212 潜艇的燃料电池系统使用 PEMFC, 系统由九个 Siemens 公司造的 $34 kW$ 模块组成,使用金属氢化物贮存氢气,性能完全满足要求。试验表明,其可使 U212 水下最大航速达到 8 节以上,并可持续航行 7 天以上,在与柴油机、蓄电池配合使用时,水下的持续最大

航程超过 1600 海里，是 U209 的 4 倍以上。

5.2.2 AIP 系统燃料电池选型及氢源问题

(1) 优先选用 PEMFC。PEMFC 工作温度合适，比功率高，工艺相对简单，安全可靠，加上目前各国集中研究开发，技术进步快，应作为潜艇燃料电池 AIP 系统的首选。虽然 MCFC 有较大的输出功率，但是它和 SOFC 一样的缺点是工作温度太高，技术尚不成熟，工作温度达 1000℃，对电池材料和密封工艺要求相当高，而且与之紧紧相连的是氢氧源，都处在密闭狭小的潜艇空间中，一旦发生意外，将是特别危险的事情，所以在其技术条件不能大幅改观的情况下，不适于应用到潜艇上。AFC 和 PAFC 的缺点则是携带大量的电解液，防漏问题十分重要，而且比功率低于 PEMFC。

(2) 氢源问题。潜艇使用氢——氧燃料电池系统的氢源问题包括氢气的制造、供应、储运和艇上携带的问题。也就是说必须有一定规模的氢气生产能力、设施；要在潜艇基地建立加氢站，向潜艇供应、加注氢气。实艇氢气携带方法有液 H₂、贮氢合金、非金属材料储氢等。其安全问题非常重要。以柴油、汽油、甲醇、甲烷或其他燃料，经过重整分解为 H₂ 的氢源方案是将来研究发展的重点。

(3) 使用 PEMFC 的 AIP 系统面临的问题。需要进一步提高比功率，完善电池工艺技术。目前 AIP 系统燃料电池的功率都在 300kW 以内，可向蓄电池充电，参与推进和其他用途的供电。但是它的功率相比于整个推进系统比例是相当低的，因而作用也有限，只是在低速航行时起一定作用，相对延长水下作业时间。目前燃料电池比功率目标是 1.2kW/L，但实际上远远未达到这一指标。因此不断提高其技术水平特别是比功率，可在同等装备的情况下成倍的增加燃料电池即 AIP 系统的功率，增加 AIP 系统的作用。

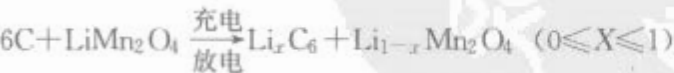
(4) 系统的完善和安全性。燃料电池系统具有一定的复杂性，工艺技术有一定的难度，要携带大量的燃料和氧气。而潜艇又是独立密封移动的作战工具，因此保证其安全可靠对整个潜艇来说是相当重要的。

6 船用锂离子电池

6.1 原理及特性

锂离子电池的充放电机理被称为“摇椅式”机理，即充放电过程中锂离子在可嵌入锂的碳材料负极和含锂的合金氧化物正极之间做往返迁移运动。电池的运作过程实际上是锂离子在两极之间嵌入和脱嵌的过程。故这种电池也称为“摇椅电池”。

如果负极是嵌入锂的碳材料 C₆—结晶型碳（以石墨为例），正极是锂的金属氧化物（以 LiMn₂O₄ 为例），则电池反应可表示为



利用锂离子在碳中的嵌入与脱嵌反应取代在纯金属锂上的沉积与溶解反应，使锂离子电池较以往的锂二次电池，其安全稳定性得到大幅度提高。

与初期研制的该类电池相比，目前锂离子电池性能有了明显提高：

- (1) 能量密度高，UR18650 型的体积容量和质量容量分别可达 300Wh/cm 和 125Wh/kg。
- (2) 平均电压高（约 3.6V）。

- (3) 输出功率大。
- (4) 自放电小，无记忆效应，循环性能优越。
- (5) 无需维修，无污染。
- (6) 使用寿命长，80%DOD 充放电可达 1200 次以上。

6.2 分类及选型

目前，市场上有液体电解质和聚合物电解质两种锂离子电池，电池正极材料主要为锂钴氧，也有锂镍氧、锂锰氧等材料，负极材料主要为碳基材料。

锂离子电池有多种多样的型号，电池容量和用途随电池形状、大小的变化而变化。形状主要有圆柱形、方形和扣式三种，扣式电池主要为小型电池。

圆柱形电池编制原则：



方形电池编制原则：



表 3.4-14 列出了几种标准型号的锂离子电池以供参考。

表 3.4-14 标准型号的锂离子电池

电池类型	ICR18650	ICP083448	ICR17670
标称电压 (V)	3.6	3.6	3.6
高度 (mm)	63.0/65.2	47.2/48.9	65.0/67.3
直径 (mm)	17.2/18.8	—	16.0/17.3
宽度 (mm)	—	33.4/34.4	—
厚度 (mm)	—	7.6/8.8	—
放电中止电压 (V)	2.5	2.50	2.50
循环寿命中止电压 (V)	2.75	2.75	2.75

6.3 结构和制造工艺

实用锂离子电池的结构一般包括正极、负极、电解质、隔膜、正极引线、负极引线、中心端子、绝缘材料、安全阀、PTC 和电池壳。

锂离子电池的生产流程随类型不同而各异，本节以液态电解质锂离子电池的工艺流程图为例说明，如图 3.4-5 所示。电池制造主要由四个工序组成：正负极制造→卷绕成电芯→组装→封口。

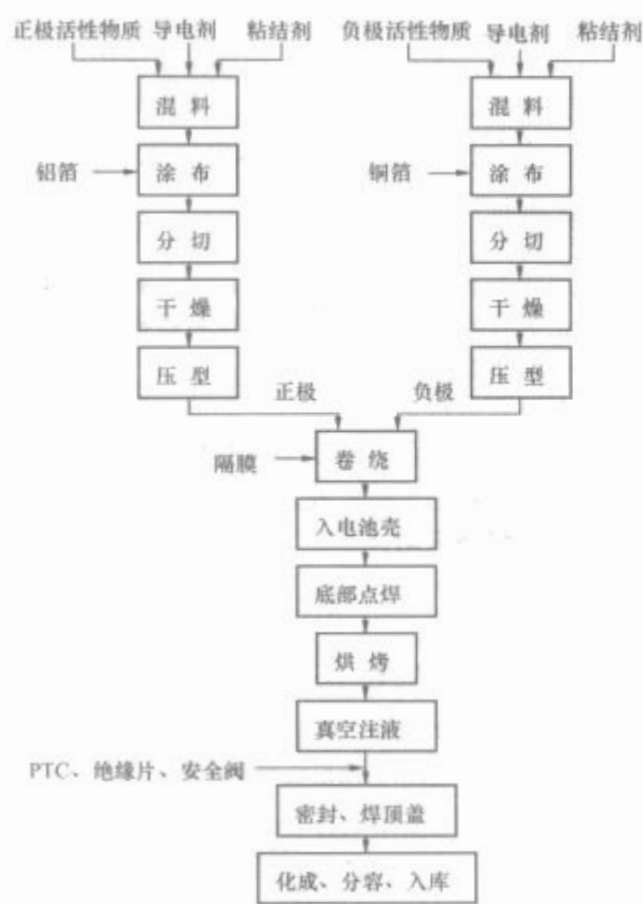


图 3.4-5 锂离子电池制造工艺流程简图

6.4 使用及维护

锂离子电池为免维护电池，用户使用简单方便。但值得注意的是，过充电和过放电对电池的使用寿命及安全性有很大影响，因此，对此必须进行十分严格的控制，虽然一般有防过充过放的装置或电子线路，但在使用过程中，也应尽可能防止该类事件的发生。锂离子电池充电应使用专用的锂离子电池充电器，充电终止电压由充电器控制。成组电池充电时，应有相应的管理系统，自动对单体电压及温度巡回检测并适当处置。放电时，电流不应超过说明书给出的最大放电电流，放电终止电压在 2.5~2.75V，不要低于说明书规定的工作电压范围。由于放电深度浅时，循环寿命会显著提高，因此放电时不一定要降至终止电压才进行充电。锂离子

电池在贮存或使用间隙较长时，电量应保持标称容量的 30%~50%，推荐贮存电池每 6 个月充电一次。此外，不可将锂离子电池进行外部短路或放置在危险的极端环境中，否则电池性能会明显下降，甚至发生危险。

6.5 应用和发展

锂离子电池自 1991 年出现后，在十几年的时间内得到飞速发展，小容量、小功率锂离子电池产品技术已经成熟，目前已广泛应用在录像机、照相机、手提电脑、手机等装置上。在船舶领域，锂离子电池作为小型电源在通信、观通、声纳、照明等方面也已得到越来越多的应用。由于安全性能、大电流充放电性能以及电池组的一致性一直得不到很好的解决，大容量锂离子动力电池仍在开发研究中，至今未能广泛使用。

目前，国内涉及大容量锂离子电池研究的院所和厂家有十几家之多，开展的研究主要集中在电动车的应用上，已有几十安时到几百安时的产品问世，其技术水平不逊于国外。在船舶动力方面，锂离子动力电池已在蛙人运载器、远程直航水雷（T-6）、UUV 等装备上试用。

在国外船用锂离子电池方面，研究也很多。法国 Saft 公司在 MK30 操雷、AUV 等装备上试验了大功率锂离子动力电池，并于 2002 年透露了潜艇用锂离子动力电池开发计划。日本 ENAX 公司专门建立了潜艇用锂离子动力电池研发机构。美国海军深潜系统局自 1997 年以来就已开始投资锂离子电池的研制，以取代先进蛙人运送艇（ASDS-1）上使用的银锌电池。总之，国外船用锂离子动力电池已处在方案论证、概念演示的探索阶段，目前多在进行可行性、安全性以及适用性研究。

锂离子电池与传统化学电源体系相比，最显著的优点是其能量密度大，单体电压高，这对排水量和内部空间有着严格限制的鱼雷、UUV、潜艇等水上水下装备来说，有着尤其重要的意义。此外，锂离子电池是完全密封的，不需维护，对船内设备和艇员的生活环境没有任何影响。目前，锂离子动力电池正被作为最有前景的船用动力电源而受到人们的广泛关注。

第 5 章 船用配电板

1 概述

1.1 功能和组成

船用配电板是用来接受和分配船舶电能，并对发电机和电网进行保护、测量和调整等工作的设备。它是由断路器、保护电器、控制电器、测量仪表、调节和信号装置等电气设备按一定要求组合而成的。其功能有：

- (1) 正常运行时接通和开断电路（可手动或自动）。
- (2) 电力系统发生不正常运行时，保护装置动作，进行报警或切断故障电路。
- (3) 测量和显示运行中的各种电气参数，例如电压、电流、功率、功率因数绝缘电阻值等。
- (4) 进行某些电气参数或有关其他参数的调整，例如电压、频率（发电机转速）的调整等。
- (5) 对电路状态、开关状态以及偏离正常工作状态进行信号指示。

1.2 分类

船用配电板种类很多，常用的船用配电板按用途分类有：

- (1) 主配电板。用于控制和监测主发电机的工作，并将主发电机产生的电能，通过主电网或直接给用电设备配电的配电板。
- (2) 负载中心。在用电负载较多的大中型水面舰船上，将电站的部分配电屏通过汇流排馈线电缆延伸至某一区段或负载密集区域，并向该区段或区域内的分配电板（箱）或单个负载供电的配电中心。
- (3) 区配电板。设置在水面舰船某一区段内，用于接受主配电板所馈送的电能，并向所在区段及邻近区段内的分配电板（箱）或单个负载供电的配电设备。
- (4) 分配电板。用于对最后分路进行配电，并装有一个或多个过电流保护设备的组合装置。通常又可分为：
 - 1) 电力分电箱。
 - 2) 照明分电箱。
 - 3) 无线电分配电板。
 - 4) 助航通信分配电板。
 - 5) 专用设备分配电板。
- (5) 舱室配电板。设置在核潜艇某一水密舱室内，用于接受交流主配电板所馈送的电能，并向所属舱段或邻近舱段分配电板（箱）或单个负载供电的配电设备。
- (6) 可靠配电板。核潜艇上用于向重要用电设备进行配电的专用配电板。该配电板在正常情况下由交流主配电系统供电，在应急情况下由主变流机组供电。
- (7) 应急配电板。用于控制和监测应急发电机的工作，并将应急发电机产生的电能，通过应急电网或直接给用电设备配电的配电板。
- (8) 蓄电池充放电板。用于控制和监测充电机发电机或充电整流器，对蓄电池组进行充放电工作，并通过低压电网或直接给用电设备配电的配电板。

(9) 岸电箱。当船舶停泊时，将岸上电源或另一船上电源接至船上，通过主配电板（或应急配电板）给用电设备配电的配电箱。

2 船用配电板的结构设计

船用配电板应根据其安装的场所，选择不同的防护等级和安装方式。

2.1 防护等级

船用配电板的外壳防护等级根据安装处所其最低要求见表 3.5-1 的规定。

表 3.5-1 外壳防护等级的最低要求

处所	环境条件	防护等级	配电板、控制设备	岸电箱、分电箱
干燥的居住处所	只有触及带电部分的危险	IP20	×	×
干燥的控制室			×	×
控制室	滴水(或)中等机械损伤危险	IP22	×	×
机炉舱(花钢板以上)			×	IP44
舵机舱			×	IP44
冷藏机室(氨装置室除外)			×	IP44
应急贮藏室			×	IP44
一般贮藏室			×	IP44
配膳室			×	IP44
粮食库			×	×
浴室	较大的水和(或)机械损伤危险	IP34	—	IP55
机炉舱(花钢板以下)			—	IP55
围蔽的燃油分离室			IP44	IP55
围蔽的滑油分离室			IP44	IP55
压载泵舱	较大的水和(或)机械损伤危险	IP44	×	IP55
冷藏舱			—	IP55
厨房和洗衣间			×	×
双层底中的轴隧或管道	喷水危险、货物粉尘存在、严重机械损伤、腐蚀性气体	IP55	×	IP56
干货舱			—	IP55
露天甲板	大量浸水的危险	IP56	×	IP56

注 表中“×”表示按防护等级一栏要求，如不能满足时，则按环境条件一栏要求；表中“—”表示一般不应安装此种设备。

一般舱室内安装的船用配电板，其顶部应达到 IP22 的要求，在符合规定要求的干燥舱室内，其顶部的防护等级可降至 IP21；而两侧的防护等级应不低于 IP2X 的防护

措施。

当额定电压大于 500V 时，其背面应有不低于防护等级 IP2X 的防护措施。

船用配电板应尽量避免安装在受较大水和机械损伤危险的处所。如机炉舱，封闭的燃油分油机室和滑油分油机室内，如果安装在上述舱室内，其防护等级不低于 IP44。

安装在露天甲板上的船用配电板，如岸电箱等，应具有 IP55 或 IP56 的防护等级。

2.2 安装方式

2.2.1 立式安装

一般较大的配电装置，如主配电板，应急配电板、负载中心，区配电板和蓄电池充放电板等，多采用立式安装的结构，配电板下面设有底座或底脚，直接安装于甲板上，有特殊要求时，则可通过缓冲装置（例如缓冲橡胶、缓冲弹簧钢丝等），安装于甲板上。

2.2.2 壁式安装

这类配电板在两侧或上下设有安装箱脚，安装在隔壁或支架上，如岸电箱、动力分电箱等，多采用这种安装方式，壁式安装的配电板有时还附装铰链，可以摇出，以便维修。壁式安装亦称箱式结构。

2.2.3 嵌入式安装

对于要求美观或空间受到限制的处所（例如居住舱室内走道的照明分电箱）通常采用嵌入式安装。这类配电板装于隔壁内，其面板应与隔壁面齐平。

2.3 船用配电板的结构设计要点

船用配电板的结构设计包括外壳的结构设计，汇流排的选用与安装要求，发电机控制屏和配电屏等功能单元及发电机励磁装置安置部位，外部电缆的引入方法及安装尺寸的确定等。

在设计时应注意下述各点：

(1) 构成船用配电板的骨架及箱体应有足够的强度。在振动和冲击情况下，不能发生有害的变形。其外壳一般应用 1.2mm 及以上的优质碳素结构钢板制成。对于专用配电板，除岸电装置可仅具有“B”级抗冲击性能外，其他所有配电设备均应有“ A ”级抗冲击性能。对采用减振器的配电设备，应保证减振器在预定的使用期限内，其隔冲能力不会发生足以影响设备抗冲击性能的明显变化。还应保证由所用减振器构成的隔振系统在预定的使用期限内，其固有频率和共振放大率不会发生足以影响设备耐振性能的明显变化。

(2) 船用配电板上使用的紧固件，应使用耐腐蚀材料或经防腐蚀处理的碳素钢制成，作导电用的紧固件最好采用铜质材料。

(3) 船用配电板中的汇流排布置应符合下列要求：

1) 汇流排及其支承件应能承受短路时产生的电动力而不致损坏。

2) 安置时其最小电气间隙和爬电距离应符合以下规定。

a. 对于型式试验和部分型式试验的配电板，当满足污染等级 3，过电压类别Ⅲ，非均匀电场（A 情况），额定工作电压：AC 1000V、DC 1500V，绝缘材料类别Ⅲ_a，则最小电气间隙为 8mm，最小爬电距离为 16mm。

如果配电板所处的污染等级大于 3（例在机舱间），则应按表 3.5-3 的规定。

b. 对于无型式试验的配电板，其最小电气间隙和爬电距离应符合表 3.5-2 的规定。

表 3.5-2 最小电气间隙与爬电距离

额定电压 (V)	最小电气间隙 (mm)	最小爬电距离 (mm)
$U_n \leq 250$	15	20
$250 < U_n \leq 690$	20	25
$U_n > 690$	25	35

注 表中所列数值适用于带电部件之间以及带电部分与裸露的导电部件之间的电气间隙和爬电距离。

③ 对于专用船舶其最小电气间隙和爬电距离应符合表 3.5-3 的规定。

表 3.5-3 最小电气间隙和爬电距离（专用设备）

额定电压 (V)	电气间隙 (mm)	爬电距离 (mm)	
		底部与侧表面	顶部平坦表面
≤ 250	16	30	38
251~500	20	40	51
501~1000	33	64	85

注 顶部平坦表面的爬电距离适用于能积聚灰尘的不规则平表面和弯曲表面，对半径小于 76mm 的简单圆表面，爬电距离只要不小于底部和侧表面的规定值即可。

(4) 仪表、指示灯和小型开关等通常装于面板上。仪表和指示灯的布置应便于观看，经常操作的手柄应伸出面板，操作手柄的布置应便于操作。

(5) 船用配电板内的电器布置应便于调整、检修和拆换，电气元器件的固定应有防松措施。

(6) 可活动的门和面板应设有止动器，其铰链应设在正视面板的左侧以利于右手进行维护。

(7) 大型船用配电板，如船用主配电板和应急配电板等，其板前（或板后）应设有坚固的绝缘扶手。

(8) 船用配电板应设有具有足够强度的固定式或可卸式吊装件。

(9) 船用配电板的引入电缆一般应从底部引入。若由其他部位引入时，则应有防止水滴进入配电板内的措施，例如，装设围板。

(10) 用于船用配电板的绝缘材料应具有耐久性、滞燃性和不吸水性。对于酚醛树脂类绝缘材料，加工后应在干燥的条件下进行防湿处理。

(11) 安装在配电板上的仪表、开关、指示灯、按钮、操作手柄和手轮等均应有明显的耐久标牌，标明其用途和操作位置。

(12) 应有标明每个电路的用途，过载保护电器的定额或其相应整定值的耐久标志，并设置在该保护电器的所在位置。

(13) 为了防止触及相邻功能单元的危險部件，防止固体外来物从一个单元进入相邻单元，可用挡板或隔板实现配电板内部的隔离，其典型隔离形式见表 3.5-4 及图 3.5-1~图 3.5-7 所示。

表 3.5-4 隔离的典型形式

主判 据	补 充 判 据	形 式
不隔离		形式 1(见图 3.5-1)
母线与功能单元隔离	外接导线端子不与母线隔离	形式 2a(见图 3.5-2)
	外接导线端子与母线隔离	形式 2b(见图 3.5-3)
母线与功能单元相互隔离,外接导线端子与功能单元隔离,但端子之间相互不隔离	外接导线端子不与母线隔离	形式 3a(见图 3.6-4)
	外接导线端子与母线隔离	形式 3b(见图 3.6-5)
母线与功能单元相互隔离,并且所有的功能单元相互隔离,也包括作为功能单元组成部分的外接导线端子	外接导线端子与关联的功能单元在同一隔离中	形式 4a(见图 3.6-6)
	外接导线端子与关联的功能单元不在同一隔室中,它位于单独的、隔开的、封闭的防护空间中或隔室中	形式 4b(见图 3.6-7)

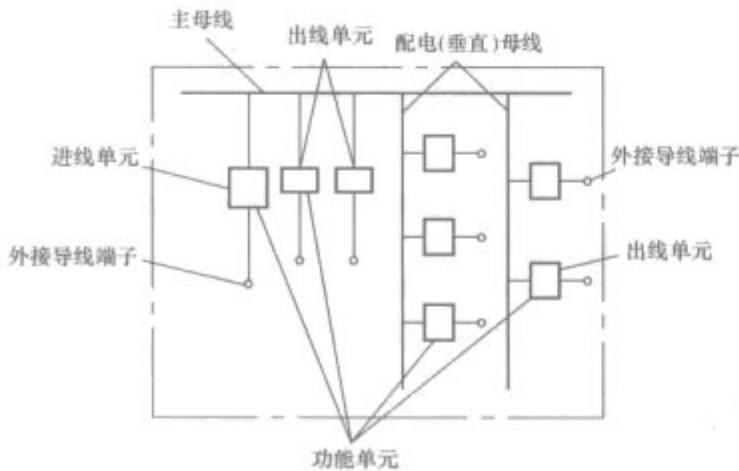


图 3.5-1 形式 1

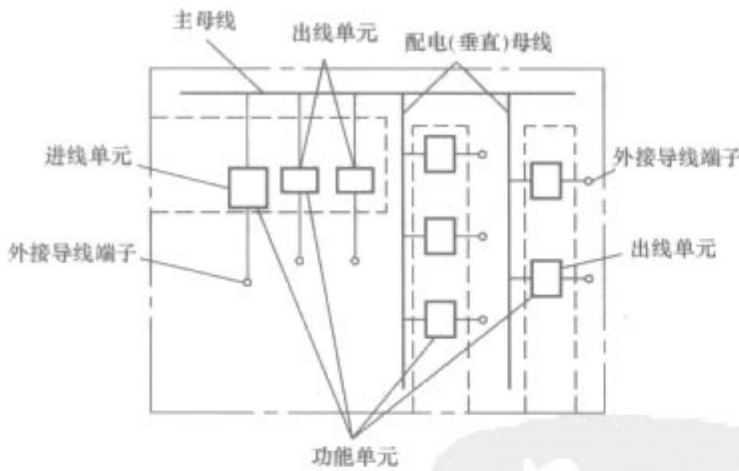


图 3.5-2 形式 2a

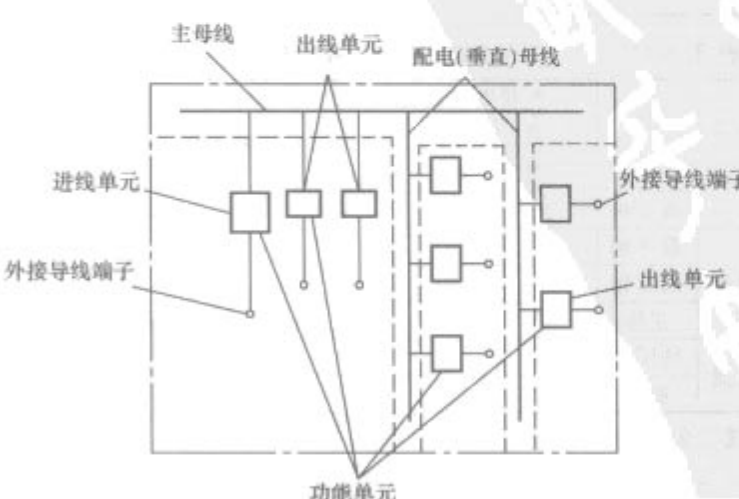


图 3.5-3 形式 2b

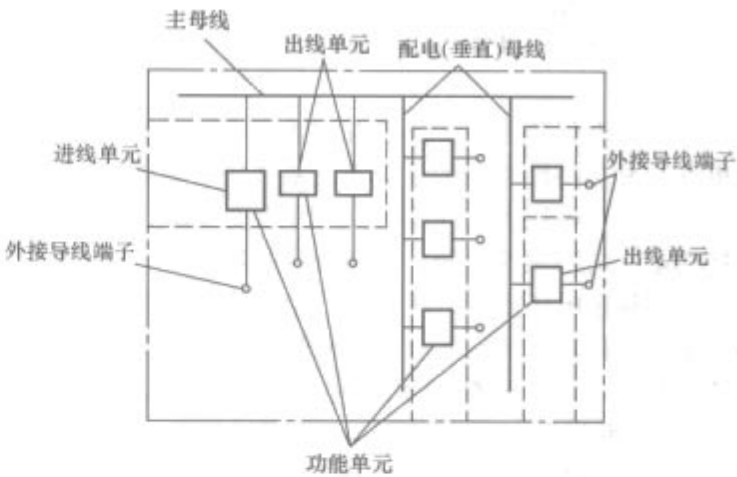


图 3.5-4 形式 3a

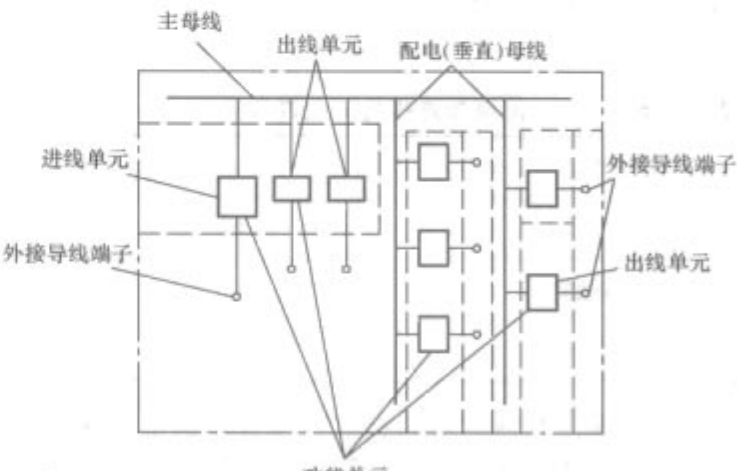


图 3.5-5 形式 3b

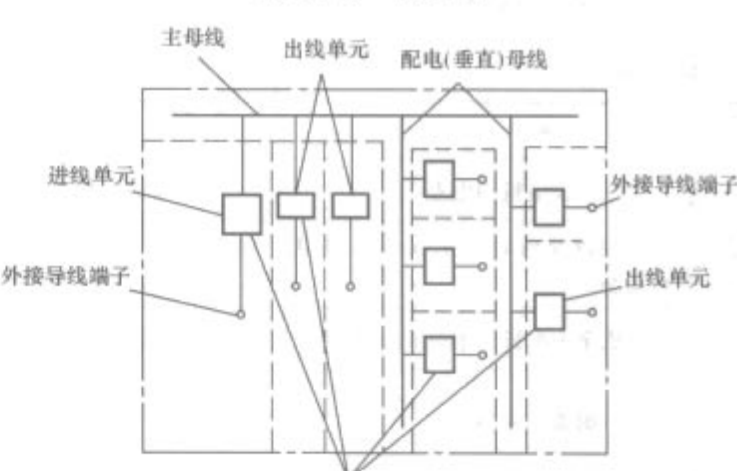


图 3.5-6 形式 4a

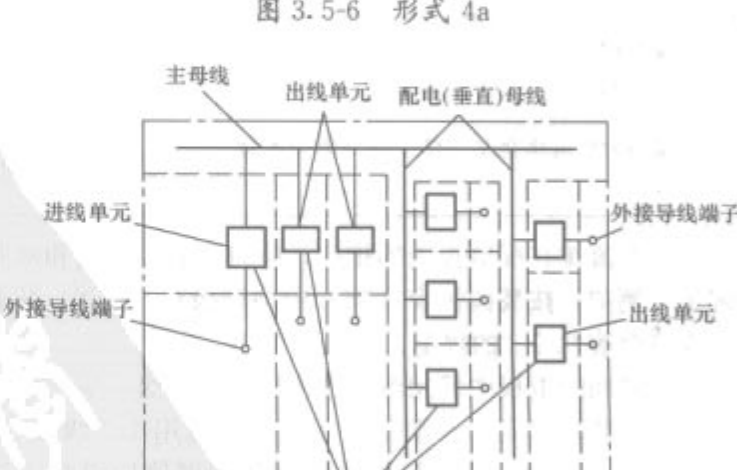


图 3.5-7 形式 4b

3 船用配电板的电气设计

船用配电板的电气设计中,应注意下述各点:

- (1) 电器元件和装置的额定电压、额定电流、额定频率、短路强度、分断能力以及使用寿命等参数应适合其指定的用途。
- (2) 各电气装置保护的设置和整定应与被保护用电设备的电性能和热特性相协调并应满足系统保护的要求。
- (3) 额定电压大于 500V 系统用的接线端子与较低电压的接线端子应明显地隔开，并有醒目的标记。
- (4) 额定电压不同的熔断器，应尽量分开安装。当熔断器的额定电压高于 500V，而熔断器座允许插入较低额定电压的熔断器，则应设置专门的警告牌。例如“注意，只适用于 660V 熔断器”。
- (5) 汇流排及其连接件一般应采用导电率为 97% 以上的铜材，其连接处应作防止腐蚀和氧化处理。汇流排的最高允许温度为 45K。汇流排连接处的温升不得高于表 3.5-5 的规定。

表 3.5-5 汇流排连接处的允许温升 K	
汇流排类别	环境温度为 45℃ 时的允许温升
铜-铜	40
铜搪锡-铜搪锡	45
铜镀银-铜镀银	55

- (6) 汇流排和裸线的颜色应符合有关规范和规则的要求。例如，按我国国家标准和中国船级社 (CCS) 的要求为：
- 1) 对直流汇流排和裸线的极性颜色规定为：

表 3.5-6 汇流排和连接导线的载流容量		
种 类		
发电机电用	汇流排	一台发电机馈电系统 发电机额定电流的 100% 以上
	汇流排	两台及两台以上发电机并联馈电系统 大于最大容量的一台发电机额定电流加上本电站余下的发电机（备用除外）额定电流总和的 80%；或大于按负载容量决定的发电机运行台数（备用除外）的额定电流总和
	汇流排	发电机至主汇排的馈电线连接导线 1 不小于发电机额定电流
馈电用	汇流排	一般馈电电路 大于供电回路（包括备用）额定电流总和的 75%，但不必大于发电机汇流排容量
	汇流排	馈电电路仅是一个负载或是一组负载的电路 不小于总负载电流
	汇流排	馈电用主汇流排至馈电分汇流排的连接导线 2 和 3 同馈电用汇流排
	汇流排	馈电分汇流排至某一馈电断路器的连接导线 4 大于保护装置的额定电流

- (8) 汇流排在配电板内的排列，应符合有关规范和规则的规定。例如，按我国国家标准和中国船级社 (CCS) 的要求，应符合表 3.5-7 的规定。
- (9) 船用配电板中所用测量仪表的精度等级，应根据供电电源品质要求选定，一般指示用仪表可选用 1.5 级仪表，但不应低于 2.5 级，常规仪表的量程和刻度值应符合下述要求：
- 1) 电压表的上量限应约为线路额定电压的 120%。
- 2) 电流表的上量限应约为线路额定电流的 130%。
- 3) 频率表应具有 ±10% 额定频率的刻度。
- 4) 供并联运行的直流发电机用电流表应指示出 15% 逆电流。

- 正极——红色；
- 均压线——应与引出极的汇流排颜色相同，再涂上白圈以示区别；
- 负极——蓝色；
- 接地线——黄色和绿色相间。
- 2) 对交流汇流排和裸线的相序颜色规定为：
- 第 1 相或 A 相——绿色；
- 第 2 相或 B 相——黄色；
- 第 3 相或 C 相——褐色或紫色；
- 接地线——黄色和绿色相间；
- 中性线——浅蓝色。
- (7) 汇流排和连接导线的载流容量应符合有关规范和规则的要求。例如，按《船用低压成套开关设备和控制设备》(GB 7061—2003) 的规定，可按图 3.5-8 和表 3.5-6 相应要求选定。

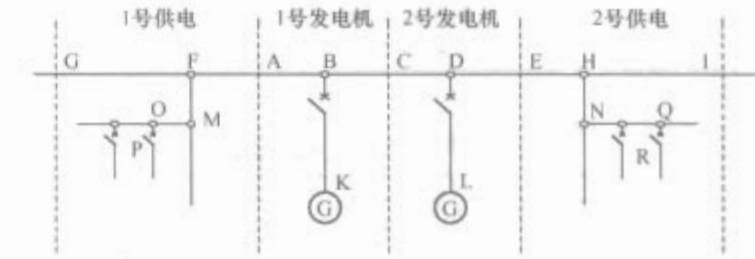


图 3.5-8 汇流排和连接导线的载流容量
AE—发电机汇流排；AG、EI—供电汇流排；BK、DL—连接导线 1；FM、HN—连接导线 2；MO、NQ—连接导线 3；OP、QR—连接导线 4

表 3.5-7 汇流排在配电板内排列					
汇流排	相序或极性	汇流排安装的相对位置			附图
		垂直布置	水平布置	向下引线	
交流	第 1 相	上	前	左	
	第 2 相	中	中	中	
	第 3 相	下	后	右	
直流	正极	上	前	左	
	均压极	中	中	中	
	负极	下	后	右	

- 注 交流中线汇流排可放在适当的位置。
- 5) 供并联运行的交流发电机用功率表应指示出 15% 逆功率。

6) 上述仪表的刻盘上应有表示其额定值的明显标志。

(10) 船用配电板所使用的指示灯的颜色,应按表 3.5-8 所示的含义选用,船用配电板中实际使用表示举例见表 3.5-9。

表 3.5-8 指示灯颜色的选用

颜色	含 义	说 明
红	危险或报警	潜在危险的警告或要求立即进行处理的情况警告
黄	注意	条件变化或临近变化
绿	安全	安全状况的指示或批准进行
蓝	根据所考虑情况的需要指定特定的含义	可以指定表示除红色、黄色、绿色含义外的任何一种特定含义。例可表示:电动机准备起动、空载发电机准备合闸,停转电动机,加热电路接通等
白	未指定特定含义(中性色)	每当应用红色、黄色、绿色存在疑问时,可用白色表示确认,同步,电话呼叫、对地绝缘指示等

表 3.5-9 指示灯颜色实际使用表示举例

白色	红色	绿色
有电压	断路器断开	断路器接通
准备	过载	工作
放电	报警	充电
在中间位置	在左舷位置	在右舷位置
—	上升	下降
—	禁止	允许
—	紧急	正常
—	倒车	正车

(11) 船用配电板所使用的按钮颜色,应按表 3.5-10 的含义选用。

表 3.5-10 按钮颜色的选用

颜色	含 义	举 例
红	处理事故	紧急停机 扑灭燃烧
	“停止”或“断电”	正常停机 停止一台或多台的电动机 装置的局部停机 切断一个断路器 带有“停止”或“断电”功能的复位
黄	参与	防止意外情况 参与抵制反常的状态 避免不需要的变化(事故)
绿	“起动”或“通电”	正常起动 起动一台或多台的电动机 装置的局部起动 接通一个开关装置(投入运行)
蓝	上列颜色未包含的任何含义	凡红、黄、绿色未包含的含义,均可采用蓝色
黑、灰、白	无特定含义	除单功能的“停止”或“断电”按钮外的任何功能

(12) 船用配电板的内部配线应采用最高允许温升不低于 75K(环境温度为 45℃)及相应电压等级的船用多股铜芯绞合导线。导线应敷设在用阻燃材料制成的走线槽中,或用夹线板固定。

(13) 船用配电板内所用的绝缘导线最小截面积一般不应小于 1mm²(低电平的电子电路除外)。

(14) 电压互感器和电流互感器的二次绕组应单独可靠接地,接地处应有耐久的接地标志。保护接地不能与工作接地公用接地线和接地螺钉。

(15) 万能转换开关的操作顺序应设计成:

- 1) 相序——从左至右: A 相、B 相、C 相或 AB、BC、CA。
- 2) 转速——顺时针加速,逆时针减速。
- 3) 大小——顺时针递增,逆时针递减。

4 主配电板

作为船舶主配电板,通常是将主发电机的控制、保护和监测以及配电等功能组合在一起的配电装置。

4.1 主配电板原理图设计

4.1.1 设计原则

主配电板原理图设计,必须遵守下述原则:

(1) 一般每台发电机均采用独立的控制屏。所以,应根据发电机台数和容量决定发电机屏的数量,并选定发电机保护断路器;再根据配电系统用电设备的负载大小和性质,决定配电屏的数量。

(2) 根据系统短路电流计算结果,选定发电机保护断路器和配电用断路器的通断能力。

(3) 根据系统短路电流计算结果,选定发电机保护断路器和配电用断路器的长延时、短延时和瞬时动作整定值。

4.1.2 发电机控制屏设计要点

(1) 发电机控制屏主要包括发电机励磁控制,发电机并车控制、测量仪表、保护装置、联锁报警以及指示回路等。

(2) 各发电机控制屏应设有发电机断路器,接通与断开的指示灯。

(3) 各直流发电机控制屏上应设有能单独对其电压进行调节的手动调压器。该调压器在发电机所允许的工作温度范围内,以及负载自空载至满载之间任何负载下,电压在额定值的 80%~105%范围内,电压调整精度为:

- 1) 对于额定输出超过 100kW 的发电机,为额定电压的 0.5%以内。
- 2) 对额定输出不超过 100kW 的发电机,为额定电压的 1%以内。

手动调压器的电路一般应能分断,并应有防止分断时产生过电压的措施,只有能将空载电压调低至接近剩磁电压,才允许调压器不分断。

(4) 直流发电机的均压连接线的截面,不得小于发电机至主配电板之间负极连接线截面的 50%。

(5) 各直流发电机控制屏上应设有发电机充磁设备。

(6) 在需并联运行的交流发电机控制屏上,设有对原动机转速进行遥控调节的设施,其调速范围应保证 10%。

(7) 如果发电机设有空间加热器,其加热器开关应设在发电机控制屏上,并应与发电机供电开关联锁,以保证只有当发电机停止运行时才能接通。

(8) 主发电机供电与岸电之间必须有联锁,以避免同时

供电。该联锁方式可以采用以岸电为主，以发电机为主或以供电为主等不同线路，图 3.5-9 为电动合闸联锁并以供电方为主的原理图。

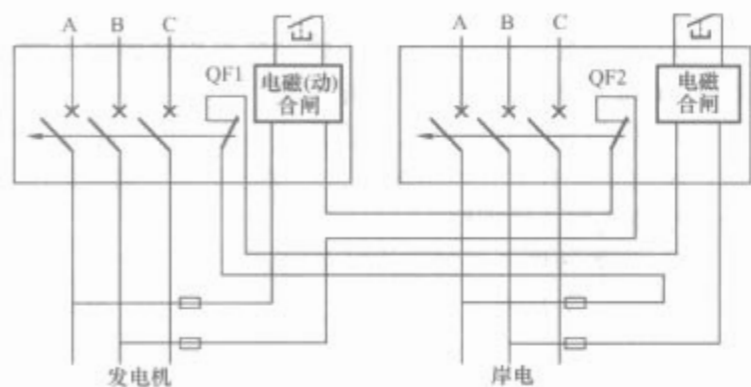


图 3.5-9 主发电与岸电联锁原理图

为了避免因断路器主触头动作不协调而造成暂短并联，往往在线路中再加中间继电器，以确保先行供电的断路器断开后，供电方的断路器才能合闸。

当几台主发电机参与联锁时，各发电机开关以一个动断辅助触头相串联后与岸电开关合闸电源线路串接，岸电开关以数个动断辅助触头分别与各发电机的合闸电源线相串接。

(9) 发电机控制屏上必须装设的测量仪表见表 3.5-11 要求。

表 3.5-11 发电机控制屏装设测量仪表最低要求

发电机种类	运行状态	仪表种类	数 量
直流	单机运行	电流表	各发电机一个(接于正极)
		电压表	各发电机一个
	并联运行	电流表	各发电机一个(接于正极)
		电压表	2 个(一个能测量汇流排电压、一个能测量各发电机电压)
交流	单机运行	电流表	各发电机一个[能分别测量各相(线)电流]
		电压表	各发电机一个[能分别测量各相(线)电压]
		功率表	各发电机一个(容量小于 50kW 或 50kVA 除外)
		频率表	各发电机一个
		兆欧表	一个①
		励磁电流表	各发电机一个①
	并联运行	电流表	各发电机一个[能分别测量各相(线)电流]
		电压表	2 个[一个能分别测量各相(线)电压、一个能测量汇流排电压]
		功率表	各发电机一个
		整步表	各发电机公用一个
		频率表	2 个(一个测量汇流排频率、一个测量各发电机频率)
		兆欧表	一个①
		励磁电流表	各发电机一个①

① 只在必要时设置。

(10) 测量仪表可以采用直接或间接连接，间接连接，直流可采用分流器和分压器。交流可采用电流互感器和电压互感器。电流互感器的二次侧额定电流一般为 5A；电压互感器的二次侧额定电压一般为 100V。为了节省测量仪表，

通常采用一个测量仪表与一个转换开关组合通过转换进行各相参数测量。

(11) 当使用电压互感器时应注意下述各点：

- 1) 二次侧要接地。
- 2) 一次侧用熔断器实现短路保护。
- 3) 二次侧输出应为高阻抗。
- 4) 相序和极性应符合有关仪表的要求。

(12) 当使用电流互感器时应注意下述各点：

- 1) 二次侧要接地。
- 2) 一次侧不能设熔断器。
- 3) 二次侧输出为低阻抗。
- 4) 严禁二次侧绕组开路运行。

(13) 当主发电机台数较多时，为了便于并车操作及集中监视，往往还设有同步屏（或称并车屏）。同步屏应该装设的测量仪表及操作开关，视发电机台数多少及用户要求而定。

4.1.3 配电屏设计要点

(1) 通常重要设备和大功率负载都由配电屏设独立的供电回路。

(2) 除独立供电回路用电设备侧已设有过载保护外，一般配电屏上供电断路器均设置短路保护和过载保护。

(3) 主配电板上应设有连续监测绝缘电阻并在绝缘电阻异常低时能发出声光信号的绝缘电阻监测报警器，该绝缘电阻报警器应能分别监测不同电压等级的电网绝缘。通常装于主配电屏上。

(4) 配电屏上通常也装有电流表，以测量馈电电路的负载电流。三相电流系统一般只测量一相电流。测量点超过一路时，需装设转换开关、每一电流表的测量点一般不超过 6 点。电流表所测量的负载一般为：

1) 主要的辅机，如主机滑油泵、主机海水冷却泵、主机淡水冷却泵和舵机等。

2) 功率较大的辅机，如舱底泵、消防泵、起货机、起锚机和油船的货油泵等。

(5) 照明负载常集中在一屏上，以便于接线和操作。在交流电制中，通常采用照明和电力变压器给照明负载和低于主发电机电压等级的负载供电。变压器断路器也装于该配电屏上。由于电压不同，还应装设下列测量仪表和开关：

1) 电压表及其转换开关，以测量照明和电力变压器二次侧的三相电压。

2) 电流表及其转换开关，以测量照明和电力变压器二次侧的三相负载电流。

(6) 配电屏各用电设备的供电断路器电路布置通常大容量断路器放在下边，小容量断路器放在上面，并尽量使容量相同的断路器在同一列，以利于汇流排的布置和接线。

(7) 除了自动化电站要求设置失电压保护以及特殊用电设备要求采用分励脱扣器外，配电用断路器一般都采用失电压脱扣方式。

(8) 在主配电板上应设置指示器，以指示应急电源或临时应急电源的蓄电池正在供电。

4.1.4 主配电板各屏的排列

(1) 当主配电板的发电机控制屏和配电屏较少时，可将发电机控制屏排在一边，配电屏排在另一边；当屏数较多时，一般将发电机控制屏排在中间，配电屏排列在其两边。

(2) 发电机控制屏的排列顺序应与发电机的序号一致，以便于操作和管理。

(3) 配电屏的负载可采用下述方法排列：

1) 按系统,如把机舱辅机排在一起,甲板机械和冷藏空调排在另一边。

2) 按主机,如将左主机的辅机排在一起,右主机的辅机排在另一边。

3) 按主用和备用,如主用辅机在一边,备用辅机在另一边。

4) 按分区供电,如一台发电机给一边负载供电,而另一台发电机给另一边的负载供电,但要考虑两台发电机负载的均分。

4.2 主配电板布置图设计

4.2.1 设计原则

主配板布置图设计,应遵守下列原则:

(1) 布置上要考虑安装和操作方便,同时还要考虑到设备的调整和维护方面的要求。

(2) 除了配电板屏数较少时(例如小型船舶),可将发电机控制屏放在一侧外,通常应将发电机控制屏布置在中央,两侧布置配电屏。

(3) 互为备用的两套设备的配电开关应尽量远离,通常分别布置在两侧配电屏上。

(4) 要求两路供电的设备电源开关,通常分别布置在两侧配电屏上。

(5) 用途和性质相同的负载,尽量靠近布置。

(6) 容量相同的断路器,尽量靠近布置。

(7) 用同一电流表测量负载电流的负载,尽量布置在同一屏上。

(8) 要求应急切断的用电设备(如风机和油泵等)尽量布置在同一屏上。

(9) 指示仪表应布置在面板易见位置,其高度应保证不产生视觉误差,通常布置在上面板上。

(10) 控制按钮和转换开关等应布置在易于操作的位置。通常布置在其控制的指示测量仪表及指示灯的下方,以免操作时影响观察测量仪表和指示信号。

(11) 在发电机总装机容量超过了3MW的主配电板,每台发电机必须设独立的发电机控制屏,并以钢板或滞燃材料相互隔开,主汇流排至少分成两部分,平时应由可拆卸的连接件或经船级社同意的其他器件加以连接,并尽可能地将发电机和其他双套设备均分地连接至两段主汇流排上。

(12) 主配电板上部通常设置眉灯照明,以利于操作和管理,如果主配电板设置在集控室内,也可以不设眉灯照明。

4.2.2 主配电板外形尺寸的决定

(1) 主配电板的外形尺寸取决于主发电机容量和台数,全船配电方式以及机舱集控室的有无等因素,所以应综合考虑上述诸因素最后决定主配板各屏的外形尺寸。

(2) 由于机舱或集控室的高度限制,再加之对操作管理方便的考虑,主配电板的高度一般为2m左右,最好不要超过2.2m。

(3) 如果主配电板由多屏组成,通常要设横向扶手,主配电板各屏的上面板和下面板尺寸应保持相同,上面板和下面板一般以扶手高度分隔,各屏的深度应保持相同。

(4) 发电机控制屏尺寸的决定,除了应考虑发电机主开关、励磁装置、调频调载等装置外,还必须注意发电机主开关的安全喷弧距离。相同容量的发电机控制屏的宽度应尽量相同。

(5) 配电屏的宽度取决于安装配电断路器的容量大小和数量的多少,通常不超过1m。

封闭式主配电板上主要电器元件的典型布置示例见图3.5-10~图3.5-13。

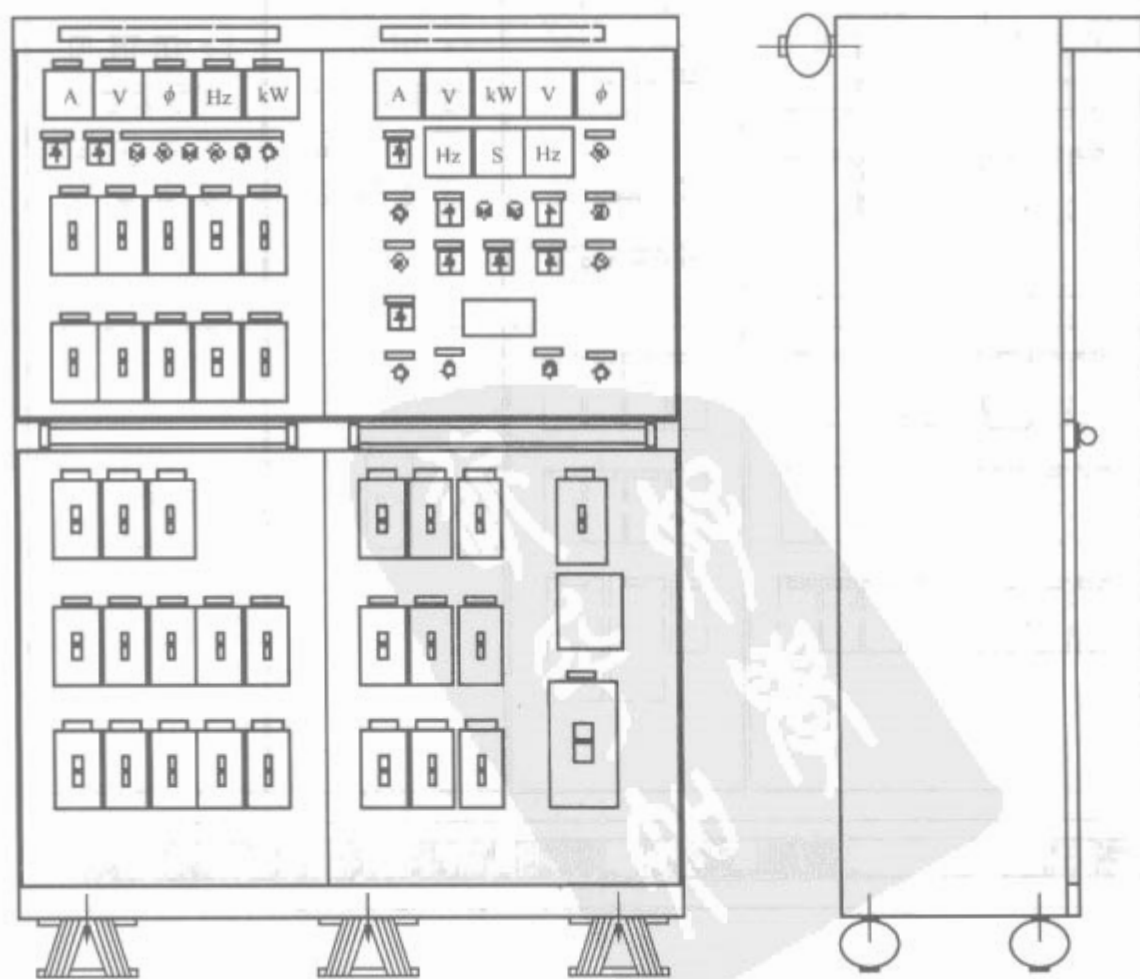


图 3.5-10 1号主配电板配置图

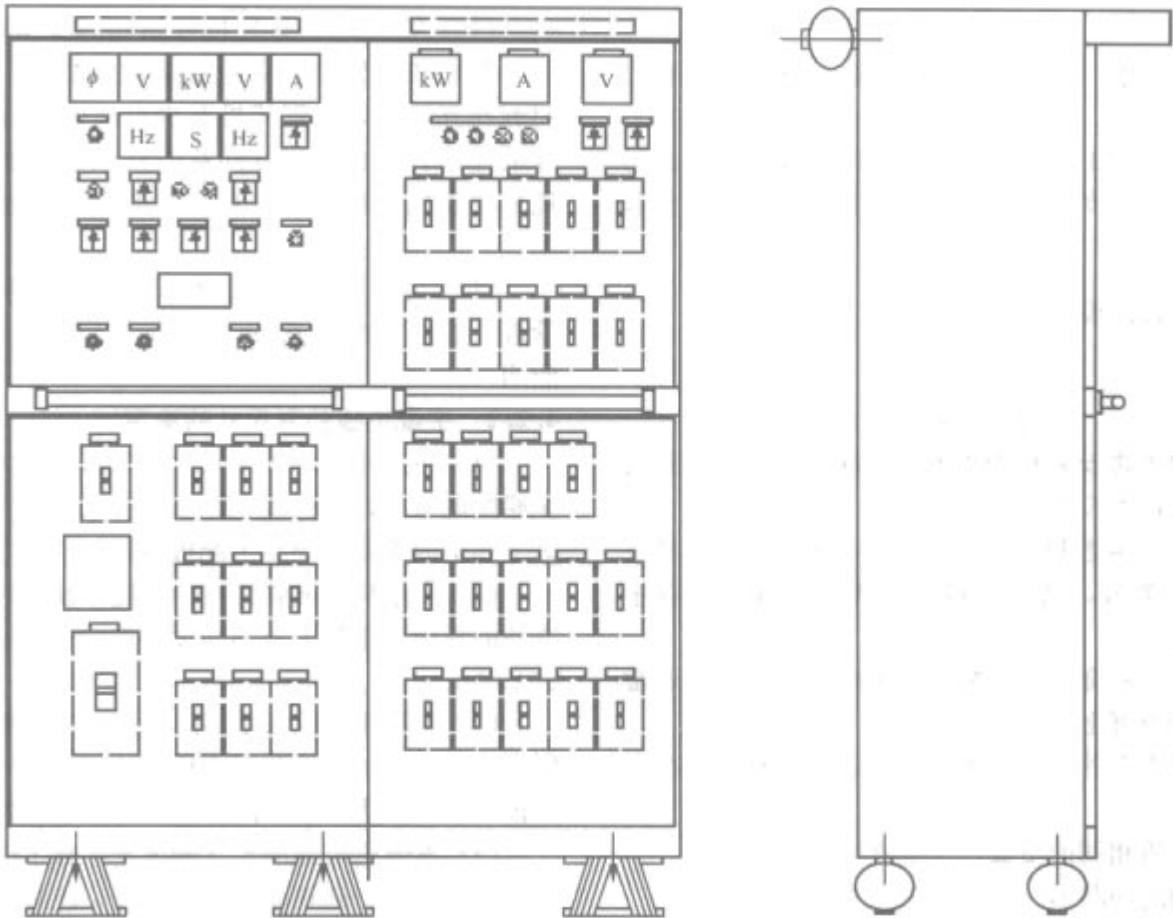


图 3.5-11 2 号主配板布置图

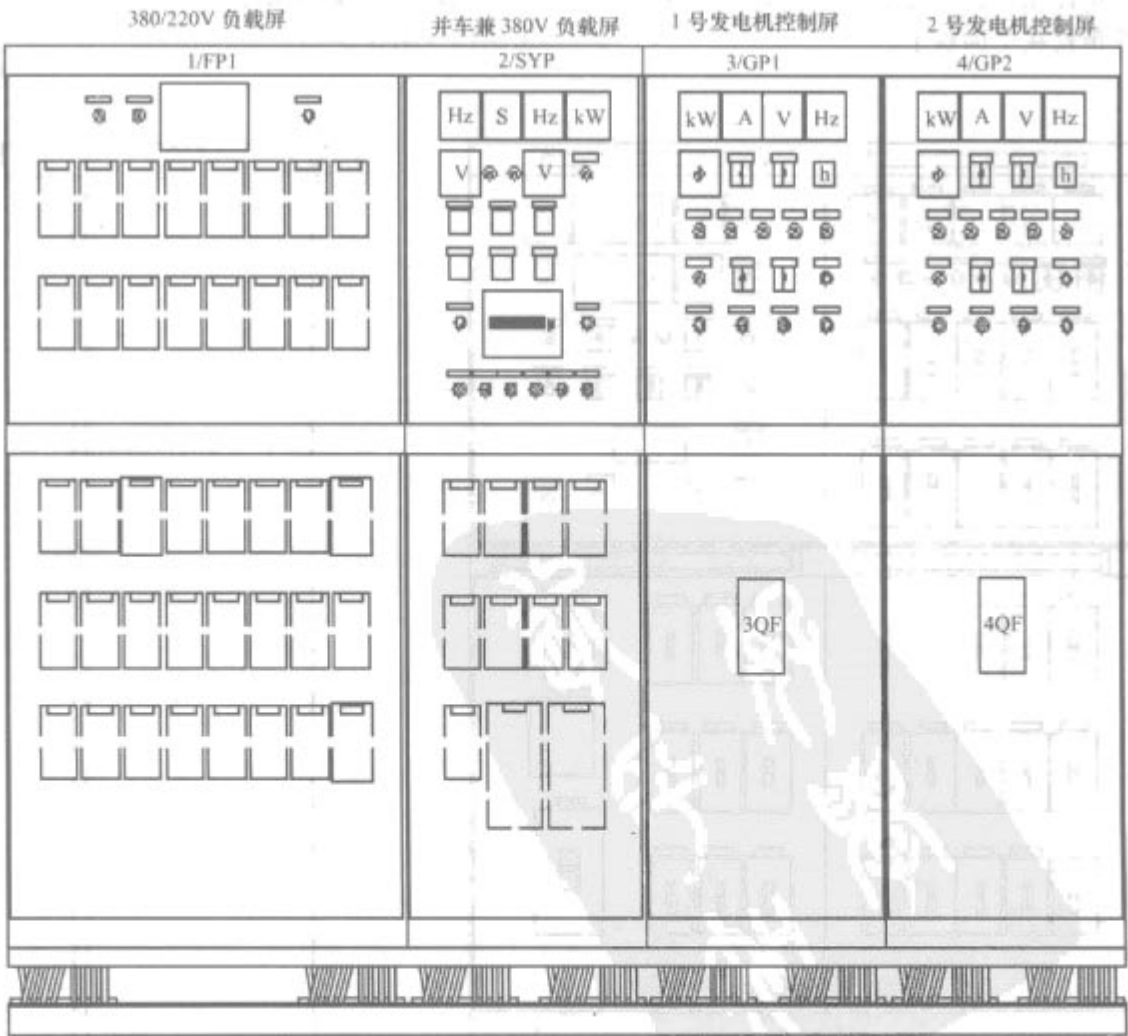


图 3.5-12 前主配板布置图

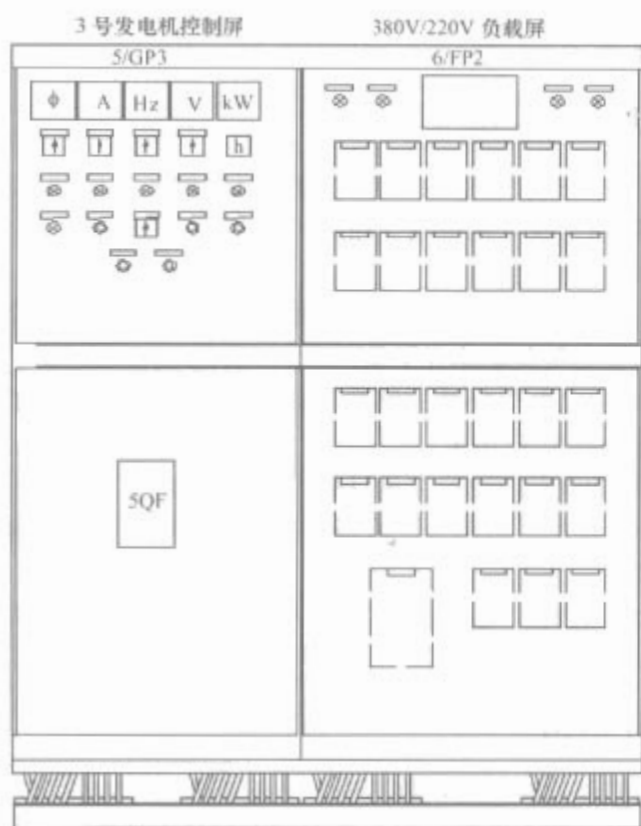


图 3.5-13 后主配电板布置图

5 负载中心

负载中心应设置在负载密集区，便于向各负载组或单个负载供电的部位。负载中心至少应配置下列电器：

- (1) 具有所需电流额定值和保护功能的断路器。
- (2) 绝缘监测装置。
- (3) 进线隔离开关或隔离装置，或在主配电板设置一馈电断路器。
- (4) 根据容量设置相应的电压表、电流表及仅用电流互感器和电压互感器。

作为终端配电控制时，应设计成抽屉式结构，以能方便地检修和更换。

用于电动机控制单元中的电流表，应选用过载型电流表。

6 区配电板

置于舰船某一区段内，用于接受主配电板所馈送的电能，并向所在区段及邻近区段内的分配电板（箱）或单个负载供电的配电板，其功能与负载中心类似，至少应配置同5条负载中心要求的电器。

7 分配电板

分配电板也称分电箱，主要有电力用和照明用两种，为相互靠近的成组负载或执行同一功能的多个负载供电。在设计制作时应注意下列各点：

- (1) 结构形式。根据安装地点选择合适的箱体防护等级。一般采用防溅式或防水式，箱内用于连接的汇流排应避免采用裸露的铜排。箱体内侧应有可靠的电缆固定结构。
- (2) 配电方式。根据配电系统选择合适的电制和线制。
- (3) 电压等级。根据配电设备要求选择合适的电压等级。
- (4) 电路数和电流容量。根据电力系统二次网络设计，选择合适的配电路数和各分路的电流容量，每个分配电板的最多分路数应不超过14路，其中包括1~2路的备

用分路。

(5) 系统保护要求。根据电力系统保护要求，选定合适的保护装置（断路器或熔断器）。除非分配电板本身设有电源总开关，且所接的其他负载均允许短时断电，否则对由熔断器引出的供电分路一般应在熔断器的电源侧设置隔离开关。

8 舱室配电板

核潜艇上除反应堆舱外，各舱室应根据用电设备的数量和容量设置一块或二块舱室配电板。舱室配电板至少应配置下列电器：

- (1) 具有所需电流额定值和保护功能的断路器。
- (2) 绝缘监测装置。
- (3) 进线隔离开关或隔离装置，辅助舰船可只在主配电板设置一馈电开关。
- (4) 根据容量设置相应的电压表、电流表及仅用电流互感器和电压互感器。

9 可靠配电板

可靠配电板应具有来自交流主电站和主变流机组的双重供电功能。在正常供电情况下，可靠配电板由交流主电站供电，在应急情况下可靠配电板由主变流机组供电。

可靠配电板至少应有下列装置：

- (1) 引自交流主电站和主变流机组两路电源自动转换和控制功能单元（自动电源转换开关或带联锁的双接触器等）。
- (2) 指示各路电源是否带电的指示灯。
- (3) 配电用保护断路器（例如塑壳断路器）。

10 应急配电板

在有应急发电机的船舶上，应设有应急配电板，以控制监测和保护应急发电机，并进行配电。

应急配电板的设计应考虑如下几点：

- (1) 应急配电板应能从船舶几个电源得到电力，其原则为：
 - 1) 当正常工况下，应急配电板由来自船舶主电站的正常电源或备用电源供电。
 - 2) 在应急工况下，应急配电板由应急发电机供电。
 - (2) 应急配电板应能按以下原则进行供电电源转换：
 - 1) 当正常电源失电时，改由备用电源供电。
 - 2) 当正常电源和备用电源均失电时，改由应急发电机组供电。
 - (3) 在由应急发电机组供电的情况下，当备用电源恢复正常时，改由备用电源供电。
 - (4) 在由应急发电机组供电的情况下，当正常电源或正常电源与备用电源均恢复时，改由正常电源供电。
- 因此，应急发电机的供电电源必须与主配电板供电之间有联锁，该联锁可以采用下述方法：
- 1) 应急发电机电源开关与主配电板给应急配电板供电开关之间的联锁。
 - 2) 应急配电板电源开关与主发电机电源开关之间的联锁。
 - 3) 主配电板与应急配电板之间的失电联锁。
- (3) 应急配电板上应装设测量照明电网的电压表，对于大装机容量的应急配电板，有时还应装设变压器二次侧电流、重要负载和大功率负载电流的电流表。
- (4) 应急配电板上应装设连续监测绝缘电阻并在绝缘

电阻异常低时发出声光报警的绝缘电阻监测报警器。该绝缘电阻监测报警器应能分别监督不同电压等级的电网绝缘。

(5) 应保证主电源失效时能自动起动应急发电机,并自动接至应急配电板保证在45s内给应急负载供电。

(6) 如果应急电网为独立的电网(即平时不是由主配电板供电),则应急配电板配电回路最好不装设开关,而只用熔断器作为保护装置。

(7) 直流电制船舶接用交流岸电时,应考虑应急照明也能使用交流岸电。

11 蓄电池充放电板

蓄电池充放电板的设计和安装,应注意下述各点:

(1) 作为应急电源的蓄电池组,必须保证承载应急负载而无需再充电,并在整个放电期间蓄电池组的电压变化应能保持在额定电压的 $\pm 12\%$ 范围内;当主电源供电失效时,自动接应急配电板(即蓄电池充放电板)并对规定的各项设备供电。

(2) 作为临时应急电源的蓄电池组,必须保证承载临时应急负载而无需再充电,并在整个放电期间蓄电池的电压变化应能保持在额定电压的 $\pm 12\%$ 范围内,当主电源或应急电源供电失效时,应能立即自动向规定的各项设备供电。

(3) 除浮充电以外,蓄电池充电装置应能在10h内将蓄电池充电到额定容量的80%。可以采用下列类型充电装置,按具体要求选定:

1) 用充电机组充电。此时调节发电机电压用的励磁变阻器可以设在蓄电池充放电板内或充放电板外。

2) 用船舶交流电源经整流装置整流后充电。可以设有“快充”或“慢充”及其转换开关。

3) 对于主电源为直流电制的船舶,可用电阻降压充电。

(4) 蓄电池组充电设备的电源应设有电源开关、保护装置和电源指示灯,以进行短路过载保护及显示。

(5) 每一充电回路应设有防止逆流的装置,一般采用整流器或逆流继电器,也可采用欠流继电器或其他保护方式。

(6) 应设有测量每一充电回路的充电电流的电流表,如果需要测量放电电流时,则该电流表的刻度应为双向的。

(7) 应有测量每一蓄电池组的充放电电压的电压表。

(8) 供电给应急照明或临时应急照明及警铃等的蓄电池组,其充放电回路的设计应确保应急情况发生时即使在充电位置仍能放电。

(9) 应急照明或临时应急照明须在主电网(或应急电网)供电失效时自动接通,通常采用由电网电压控制接触器来实现。警铃也可采用遥控接触器来接通电路。上述接触器一般均装在充放电板内,有时可另设接触器箱。

(10) 蓄电池充放电装置应设有绝缘监测装置,并应有与蓄电池的机械通风装置进行电气或机械联锁的设置,以防止在通风机未工作时进行充电作业。

(11) 蓄电池充放电板应尽可能靠近蓄电池组安装。但不得与蓄电池组安装在同一处所,如果充放电板离蓄电池组较远,蓄电池的保护装置(例熔断器或断路器)应布置在靠近蓄电池组的处所,但不能与蓄电池组安装在同一处所。

(12) 蓄电池浮充电装置应有从浮充方式转化为循环充电方式的功能。

(13) 蓄电池自动充放电装置应具有防止蓄电池过充、过放的保护环节和故障报警,并保证在任何情况下都可使蓄

电池组转入应急放电,蓄电池自动充放电装置应能转换为手动操作。

12 照明分配电板

(1) 照明分配电板(箱)的分路数最多不应超过14路(其中包括1或2路备用分路)。

(2) 电气连接。

1) 三相系统中的单相电路的连接,应使得在每个三相电路的各相负载能相互平衡。

2) 输出电气分路的路数由设计决定,最后分路的单路的容量应不大于16A。

3) 接地点应设置在显目处,并标有接地符号。

(3) 保护。照明分配电板的每条分路应设有过载和短路保护设备。

(4) 隔离。每一条分路的照明开关应能切断所有绝缘极。

13 岸电箱

船舶停泊时或进坞修理时,一般都通过岸电箱接用岸电源或另一船上电源。岸电箱应有下列基本性能:

(1) 岸电箱内应设有能切断所有绝缘极(相)的断路器或开关加熔断器进行保护,其整定值按配电要求整定。

(2) 指示输入电压的指示灯或电表。

(3) 用于连接软电缆的合适的接线端子。

(4) 对岸电为中性点接地的交流三相系统,应设有接地接线柱,以便将船体接至岸上的接地装置或岸上电网的零点。

(5) 应有检视岸电极性(直流时)和相对船舶配电系统的相序(三相交流时)是否相符的设施。

(6) 标明船电系统的配电系统的形式、额定电压和频率(对于交流)的铭牌。

(7) 有要求时,应装电能表。

(8) 对于三相交流岸电箱,可以采用指示灯组成相序指示器。

14 船用配电板检验

14.1 船用配电板的检验

船用配电板的检验分为:

(1) 型式试验。

(2) 出厂检验。

(3) 系泊试验和航行试验。

14.2 型式试验

按GJB 913A—2005《舰船用配电装置和控制装置试验方法》的规定,型式试验完整的项目内容如下;根据产品具体使用场合及用户要求对上述项目内容可以进行剪裁。

(1) 性能检验项目:

1) 一般检查。

2) 动作性能试验。

3) 耐电压试验。

4) 绝缘电阻测量。

5) 温升试验。

6) 短路强度试验。

7) 电源电压和频率变化试验。

8) 外壳防护试验。

- (2) 机械环境性能试验项目：
- 1) 倾斜、摇摆试验。
 - 2) 振动试验。
 - 3) 冲击试验。
 - 4) 颠簸试验。
- (3) 气候环境性能试验项目：
- 1) 湿热试验。
 - 2) 霉菌试验。
 - 3) 盐雾试验。
- (4) 带电子组件的附加试验项目：
- 1) 高温试验。
 - 2) 低温试验。
 - 3) 电源电压和频率瞬态变化试验。
 - 4) 电磁兼容试验。

14.3 出厂试验

船用配电板完工后应进行下列试验。

(1) 进行效用试验，检查配电板上的按钮、仪表、各开关、配电电器等的效能是否符合规定要求。

(2) 按下列规定进行耐电压试验：试验时间为 1min，应无击穿或闪络现象。

试验时，半导体器件应拆除，同时允许不接测量仪表、电容器、指示要等附属设备，试验电压应施加在所有带电部分与框架之间及各相电路之间。

1) 主电路以及与主电路直接连接的辅助电路，其工频耐压试验电压按表 3.5-12 的规定。

表 3.5-12 试验电压值 V	
额定绝缘电压 U_i	介电试验电压（交流均方根值）
$U_i \leq 60$	1000
$60 < U_i \leq 300$	2000
$300 < U_i \leq 690$	2500
$690 < U_i \leq 800$	3000
$800 < U_i \leq 1000$	3500
$1000 < U_i \leq 1500$ ①	3500

① 仅指直流。

2) 不与主电路直接连接的辅助电路，其工频耐压试验电压按表 3.5-13 的规定。

表 3.5-13 试验电压值 V	
额定绝缘电压 U_i	工频耐压试验电压
$U_i \leq 12$	250
$12 < U_i \leq 12$	600
$U_i > 60$	$2U_i + 1000$ 但不低于 2000

3) 已经过介电强度试验的船电装置，其试验电压值可降低为表 3.5-16 或表 3.5-17 规定值的 85%。

(3) 在耐电压试验之后，应立即用至少 500V 的直流高阻计测量其所有载流部分对地以及载流部分的极间或相间的绝缘电阻，其值应不低于 1MΩ。

14.4 系统试验和航行试验

(1) 船舶主配电系统的试验分类与项目见表 3.5-14。

表 3.5-14 舰船主配电系统试验分类与项目类

序号	试 验 项 目	试 验 分 类	
		系泊试验	航行试验
1	绝缘电阻测量	✓	—
2	相序或极性检查	✓	—
3	配电效用检查	✓	✓
4	电压损耗或电压降测量	✓	—
5	两路或多路电源转换试验	✓	✓
6	仪表转换检查	✓	✓
7	手动和自动并车检查	✓	✓
8	接岸电试验	✓	—

注 1. “✓”表示要试验，“—”表示不试验。
2. 电压损耗或电压降测量仅在首制舰进行。

(2) 应急配电系统的试验分类与项目见表 3.5-15。

表 3.5-15 应急配电系统的试验分类与项目

序号	试 验 项 目	试 验 分 类	
		系泊试验	航行试验
1	绝缘电阻测量	✓	—
2	相序检查	✓	—
3	配电效用检查	✓	✓
4	电压损耗测量	✓	—
5	多路电源转换试验	✓	✓

(3) 事故配电系统的试验分类与项目见表 3.5-16。

表 3.5-16 事故配电系统的试验分类与项目

序号	试 验 项 目	试 验 分 类	
		系泊试验	航行试验
1	绝缘电阻测量	✓	—
2	相序或极性检查	✓	—
3	插头、插座的接插检查	✓	—
4	配电效用检查	✓	✓

15 船用配电板相关标准

船用配电板相关标准见表 3.5-17。

表 3.5-17 船用配电板相关标准

GB/T 7061—2003	船用成套低压开关设备和控制设备
GB 7251.3—1997	低压成套开关设备和控制设备第三部分：对非专业人员可进入场地的低压成套开关设备和控制设备——配电板的特殊要求
GB 11803—1989	船用交流低压配电板结构及基本外形尺寸
GJB 164.39—1986	登陆舰艇系泊和航行试验规程（柴油发电机组及主配电板试验）
GJB 202A—1998	舰船用配电装置和控制装置通用规范
GJB 913A—2005	舰船用配电装置和控制装置试验方法
GJB 1204A—2002	舰船用交流岸电控制器规范
GJB 1989—1994	舰船用分配电箱通用规范
GJB 2955—1997	舰船电力配电系统通用规范

第6章 船舶电站的监测与控制

1 概述

1.1 用途

船舶电站的检测与控制系统用来保证电站供电的连续性与供电设备的安全。

1.2 种类与特点

1.2.1 基本型电站

(1) 机组的起动、停止是在机旁进行；而机组的转速既可在机旁手动调整，又可通过伺服马达开关在主配电板上进行。

(2) 在主配电板上装有供操纵人员监视机组运行的仪表，例如电压表、频率表、功率表、同步表（需并联时）、绝缘测量仪、电流表、功率因数表等。并设有操作人员完成合闸、分断、并车、调压、调速等操作的有关开关、按钮、电位器、指示灯等。

(3) 船舶电站供电与岸电供电应连锁；电站供电与应急电站供电也应连锁（不作并联时）。

(4) 主配电板中应设有过载保护、短路保护、欠电压保护和逆功率（电流）保护，并有防止系统过电压的安全措施。

(5) 在确定汇流排在通过各种允许的伏在电流时的温升不超过 45°C 。

(6) 配电板应设计成能承受最大短路电流产生的电动力和热应力的影响。

(7) 主配电板应设刻有系统单线电路图或接线图的耐久标牌。

1.2.2 半自动电站

应具有基本型电站的功能。

用户可根据使用要求，选择下列的部分功能，也允许增加其他的功能：自动分级卸载，自动并联，自动调频调载，某些电工、热工参数的监测报警。

1.2.3 自动电站

应具有基本型电站的功能。

电站的自动控制要保证供电的连续性，并满足如下要求：但运行的单台机组发生故障时，备用机组从自动起动到投网供电的时间应不超过 45s ；当两台或两台以上机组并联运行时，其中一台机组发生故障，应有措施保证对重要负载的连续供电；按功率原则或其他使用要求自动增减运行机组的台数，以实现机组减的自动并联运行，或者实现备用机组的自动解列、停机。

1.3 工作原理

无论何种类型，何种容量的电站检测与控制系统，都是由三部分组成的，即控制系统、安全系统、监测报警系统。控制系统全面控制电站的运行，检测报警系统负责检测电站运行参数和故障报警，电站控制和监测系统在运行过程中失效或发生危及电站系统内各主要设备的故障时，安全系统应能自动产生保护性动作。结构框图如图 3.6-1 所示。

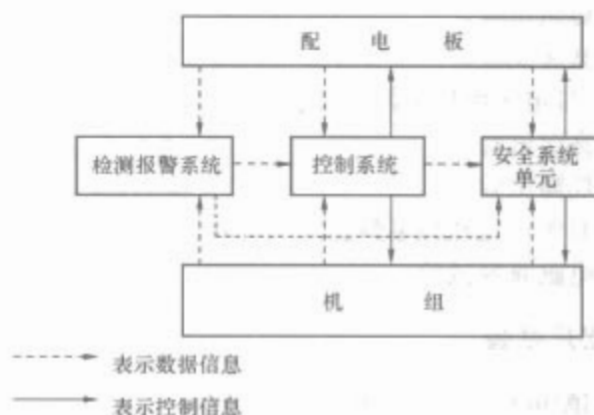


图 3.6-1 电站检测与控制系统结构框图

其基本原理都是由检测单元对发电机组、配电板、以及负载运行信息进行检测，在控制单元对获取信息进行判断与运算后，通过执行单元完成对发电机与配电板的控制（控制功能检测报警系统不具备）。原理框图如图 3.6-2 所示。

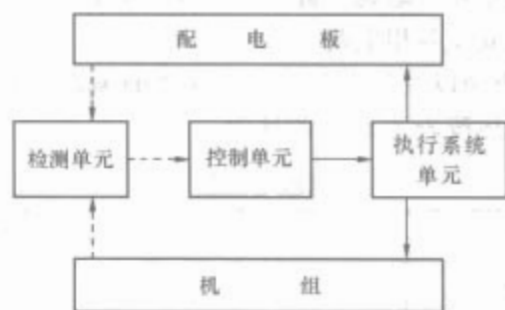


图 3.6-2 电站检测与控制系统原理框图

2 船舶电站的检测与控制系统的要求

2.1 环境适应性要求

检测与控制系统正常工作能承受环境的能力应与该系统的实际使用安装环境条件相适应。

2.2 功能模块和独立性要求

2.2.1 电站监控装置硬件模块的划分

电站监控装置硬件模块的划分一般有以下几种方法：①按照监控装置的功能划分模块；②按照监控装置安装分布位置的不同划分模块；③按照硬件功能划分模块。

(1) 电站监控装置硬件模块按照监控装置的功能划分模块，可以划分为以下几种模块：

- 1) 自启停模块。
- 2) 自动合闸/并车模块。
- 3) 自动调频调载模块。
- 4) 自动检测模块。
- 5) 报警及故障处理模块。
- 6) 功率管理模块。
- 7) 显示、通信模块。
- 8) 电源模块。

(2) 电站监控装置硬件模块按照安装分布位置的不同可以划分为以下几种模块：

- 1) 机旁监控模块。
- 2) 柴油机监控模块。
- 3) 负载管理模块。
- 4) 电站集中控制模块。
- 5) 数据通信模块。

(3) 电站监控装置硬件模块按照硬件功能可以划分为以下几种模块:

- 1) 开关量输入模块。
- 2) 开关量输出模块。
- 3) 模拟量输入模块。
- 4) 信号预处理模块。
- 5) 中央处理器模块。
- 6) 控制模块。
- 7) 显示模块。
- 8) 通信模块。
- 9) 人机对话模块。
- 10) 电源模块。

(4) 电站监控装置硬件模块的划分应根据用户的使用要求的实际情况,采用相适宜的划分方法,并对这些模块进行剪裁。

2.2.2 软件模块的划分

软件模块的划分应根据用户对电站监控装置功能的需求进行相应的增减,一般可分为:

- (1) 初始化模块。
- (2) 主流程模块。
- (3) 启动模块。
- (4) 停机模块。
- (5) 合闸/并车模块。
- (6) 调频调载模块。
- (7) 自动增机模块。
- (8) 自动减机模块。
- (9) 重载请求模块。
- (10) 采样模块。
- (11) 滤波模块。
- (12) 数据显示模块。
- (13) 故障处理模块。
- (14) 报警显示模块。
- (15) 报警应答模块。
- (16) 数据通信模块。
- (17) 人机对话装置通信模块。
- (18) 自检模块。

2.3 计算机系统的要求

2.3.1 硬件

(1) 在选用计算机的同时应根据系统装置的要求,选用合适的外围设备。应力求减少所选用的外围设备的种类和数量。

(2) 计算机监控装置应具有自检功能,自检范围一般应包括:中央处理器、输入/输出接口、系统软件以及传感器信号转换电路。

(3) 计算机操作程序的设计应使误操作或误动作不易引起系统硬件和软件的损坏。

2.3.2 软件

(1) 应尽量选用经过实践检验的成熟软件进行移植或在此基础上进行改进。自编程序时,应优先采用结构程序设计法。在调试时应避免遗漏可能的程序通路。

(2) 应尽量减少程序本身占用的内存空间和缩短计算机执行程序所需的时间。

(3) 所用语言和程序结构应能方便地移植于其他计算机系统。

(4) 应用程序应允许更改,以适用系统功能的扩展和系统性能的变化。但应采取措施使得一般人员无法实施这种更改。

(5) 应用程序应采用模块化设计,基本子程序模块可以共享,网络接口与人机对话的软件模块可以共享。

2.4 传感执行元件的要求

2.4.1 可靠性高

系统中传感执行元件的高可靠性是确保系统高可靠性的基础,因此要求使用中的传感执行元件能在恶劣环境(参照环境适应性要求)下仍能可靠地工作,失效率最低。

2.4.2 精度高

传感执行元件的精度考核指标要尽可能高,精度高的检测和控制必须有相应精度的传感执行元件来支撑。

2.4.3 响应速度快

执行元件尤其需要有快速响应的能力,各传感元件、中间执行元件和最终执行元件的相应速度决定了检测和控制对系统时间的输入输出响应能力和动作能力。

2.5 计算机网络和现场总线的要求

(1) 在节与节之间或节点处失效的情况下,网络的拓扑结构应确保共享网络的系统能继续运行,且保持数据的正常传递。

(2) 应有协议确保网络上数据传递的完整性。此外,计算机上共享网络的软件应设计成能对数据值进行有限地修改。

(3) 网络应具有以一定传递速率传递数据的能力。并应有必要的措施防止在网络过载的情况下而导致的数据延迟或破坏,同时应发出视觉和听觉报警信号。有关报警系统和安全系统显示信号的数据延迟时间应不超过2s。

(4) 应有措施确保网络在网络控制器失效的情况下仍能持续有效的运行,例如能自动转接到备用的控制器。当控制器发生故障时,在相关控制站应发出视觉和听觉报警信号。

(5) 在连接和分离进出网络的节点时,其布置应不会中断网络的正常运行,且应将其对共享网络的其他系统的影响减至最小。

(6) 应有措施能对网络的使用、故障的发生和其他必要的评估其特性的参数进行监测。当网络发生故障时应发出视觉和听觉报警信号。

(7) 网络在其安装位置应有足够的保护措施,以防机械损坏和电磁干扰。

3 船舶电站检测与控制的设计

3.1 硬件选型

硬件设备的选择应把握以下几个原则:

- (1) 性能价格比最高原则。
- (2) 技术上先进原则。
- (3) 技术上成熟原则。
- (4) 实用原则。
- (5) 方便升级扩展原则。

3.2 软件选型

应尽量选用经过实践检验的成熟软件进行移植或在此基础上进行改进。

3.3 硬件接口设计

(1) 装置的外形尺寸、安装尺寸等物理接口必须与合同(规格书)要求一致。

(2) 装置对外的输入/输出信号应符合规格书的要求,并尽可能的采用机—电、磁—电、光—电等隔离措施。

(3) 接线图(对外)、装置接线标牌图与装置实际接线桩头三者的标记号必须一致,排列位置尽量相同。

3.4 应用软件编程

(1) 进行应用软件编程时,应优先采用结构程序设计法。

(2) 应尽量减少程序本身占用的内存空间和缩短计算机执行程序所需的时间。

(3) 所用语言和程序结构应能方便地移植于其他计算机系统。

(4) 应用程序应允许更改,以适用系统功能的扩展和系统性能的变化。但应采取措施使得一般人员无法实施这种更改。

(5) 应用程序应采用模块化设计,基本子程序模块可以共享,网络接口与人机对话的软件模块可以共享。

控制系统软件程序一般流程框图如图 3.6-3。

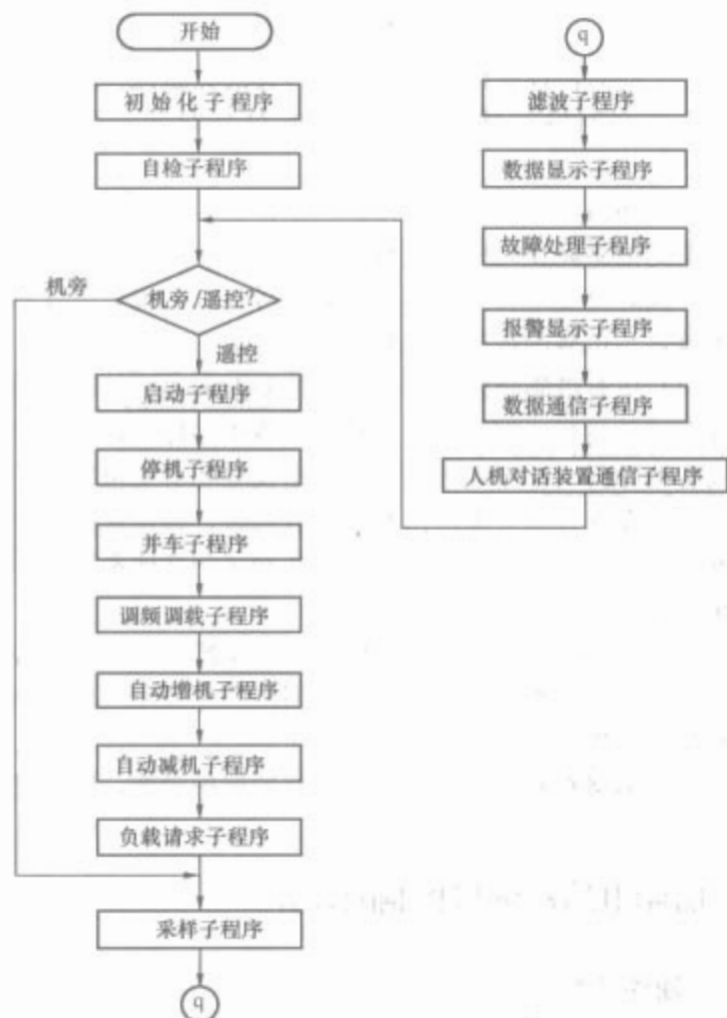


图 3.6-3 控制系统软件程序一般流程框图

3.5 结构设计

3.5.1 总体结构设计

(1) 应满足合同或技术规格书所规定的外形尺寸及安装

方式的要求。

(2) 结构设计应在确保总体对外形尺寸、质量要求的前提下,应使装置的机械强度能够满足使用环境中冲击、振动的要求。

(3) 内部结构布置设计应做到各元器件、各部件布置合理,便于维修。尽量缩短各部分之间的电气连接距离,并力争使内部布置整齐、美观。

(4) 在热设计中应将发热元器件的布置远离对热敏感的电子元器件,且发热元器件应尽量布置在箱体(或控制台)上方,必要时可加隔热板以防影响其他器件。当装置为防滴式结构时,可开有对外通风的散热口。

3.5.2 控制印制电路板的设计

(1) 要注意模块化设计,同类功能部分应归并设计,以方便调试和维修。

(2) 各功能部分的连接线应尽可能的少而短。

(3) 印制电路板上各元器件应有明确的标识,各元器件应排列整齐,相互间应有足够的距离,不应有相互接触碰撞现象。

(4) 各印制板的插头一般应有防止相互插错的措施,如确有困难不能实现时,则必须有醒目标识提示以防插错。

3.6 电磁兼容性设计

为防止电源线的传导干扰,在输入端加入与装置频率相适应的滤波器。结构上为屏蔽自装置内部产生的电磁场对外发射,为此箱体上应采取以下措施:

(1) 箱体的百叶窗口或通风口需加焊金属网罩或打孔板。

(2) 活动门隙采用导电橡胶密封。

3.7 安全性设计

3.7.1 硬件安全性设计

(1) 最小危险设计。

(2) 安全装置。

(3) 报警装置。

(4) 防误设计。

(5) 安全警告标志。

(6) 安全操作规程。

3.7.2 软件安全性设计

(1) 根据安全性需求选择操作系统。

(2) 控制软件应有身份认证功能。

(3) 控制软件应有访问控制功能,对不同的访问者设定控制等级。

3.8 可靠性设计

(1) 根据寿命剖面、任务剖面,建立可靠性模型。

(2) 进行可靠性指标的分配。

(3) 进行可靠性预计,建立可靠性框图,建立可靠性数学模型

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^k \lambda_{mi}$$

式中: λ_m 为装置任务失效率; λ_{mi} 为元器件的任务失效率; k 为同类元器件数量。

装置故障间隔时间 $MTBF=1/\lambda_m$ 。

(4) 故障模式影响分析(FMEA)(或进行 FMECA 分析):

1) 确定合理分析层次。

- 2) 列表进行分析。
- 3) 确定关、重件。
- 4) 在图样上进行关、重件标识。
- (5) 可靠性设计中采取的一些措施:

- 1) 采用的元器件应经过老化筛选。
- 2) 硬件的多层化结构,即由信号源至计算机或由计算机至执行部件经过机—电、磁—电、光—电等多级隔离。

- 3) 电源线、信号线可采用屏蔽措施,强、弱电信号线应尽可能避免近距离平行布置。

- 4) 使用高精度、高可靠性的开关电源。
- 5) 尽量提高接口电路的电源等级,以提高信噪比。
- 6) 装置、印制电路板、芯片的电源输入端应采取相应的滤波措施。

- 7) 模拟放大采用低温漂、高精度放大元件,并采用浮地式差动放大电路。

- 8) 减少中断源,尤其避免使用沿触发中断源。

- 9) 在数据采集过程中加入软件滤波。

- 10) 采用硬件冗余技术和软件冗余技术。

- 11) 硬件和软件设置自我保护和自我拯救,使系统具有很强的自拯救和自恢复能力。

- 12) I/O 和系统的自检。

- 13) 可维修性设计。①供电系统维修性定量要求由平均修复时间 $MTTR$ 和平均维修间隔时间 T_{bm} 予以表征;②供电系统维修性定性要求应体现适修性和备件准备程度,主要包括:选用标准件,提高标准化程度和互换性;有良好的可达性和适修性;检测诊断迅速、简便;采用计算机硬件、软件的模块化设计,以保证维修时快速诊断及快速更换;设计中应满足使用维修的人机要素要求。

4 控制系统的设计和试验

4.1 功能和参数

4.1.1 电站的功率管理功能

- (1) 当电网的功率裕量过大时,监控装置应根据优先级的设定次序,将在网机组中优先级最低的机组自动解列并自动停机。

- (2) 当电网的功率裕量不足时,监控装置应根据优先级的设定次序,将备用机组中优先级最高的机组自动启动并自动投入电网运行。

- (3) 若舰船上有单台容量相当大的用电设备,监控装置应设置重载询问功能。

4.1.2 发电机自动启动的要求

- (1) 对于能自动启动的多台主发电机组应有启动顺序设定装置。启动顺序的设定应能灵活地进行选择、组合和变更。当某台机组启动失败时,应能自动将启动指令转移给下一台机组。

- (2) 自动启动的柴油发电机组可设有预热和预润滑的措施。自动启动的汽轮发电机组应处于热备用状态。

- (3) 电站监控装置对自动启动的柴油发电机组一般具有3次连续启动功能,连续3次启动失败,监控装置应进行启动失败报警。

4.1.3 自动连接到不带电的汇流排

- (1) 电网失电压、备用发电机组的主开关(或断路器)应在备用发电机的空载电压大于其额定电压的85%时方能合闸。为了使最初的负载不超过发电机的容量,应对负载的重新投入加以限制。

- (2) 应采取措施避免两个或两个以上的发电机组的主开关(或断路器)同时自动合闸。

- (3) 启动指令传感元件(如欠电压继电器)的电源中断时,应有防止发电机组的主开关(或断路器)不适当自动合闸的措施。

- (4) 因短路故障而引起电网失电压,备用发电机组的主开关(或断路器)的自动合闸只允许进行一次。合闸失败应自动报警。

- (5) 当电网出现短路故障而造成在网发电机组主开关脱扣时,监控装置应具有在人工应答、复位前防止主开关重合闸的功能。

4.1.4 自动并联

具有多电站的舰船,各电站的发电机组应具有自动并联运行的性能。发电机之间、发电机组与汇流排之间、汇流排之间,应能自动同步合闸和自动调频调载。

4.1.5 自动同步合闸

- (1) 发电机组之间、发电机组与带电汇流排之间以及两个带电汇流排之间(以下简称待并系统与运行系统之间)的自动同步一般应采用准同步法。

- (2) 应选择动作时间及其离散性均尽可能小的开关(或断路器)来作为待并系统与运行系统之间准同步的合闸开关。一般这类合闸开关(或断路器)的动作时间不宜超过0.3s,当合闸开关(或断路器)的动作时间小于0.1s时,可采用超前相角方案;当合闸开关(或断路器)的动作时间在0.1~0.2s时,可采用超前时间或超前相角方案;当合闸开关(或断路器)的动作时间大于0.2s时,应采用超前时间方案。

- (3) 自动准同步合闸后的冲击电流不应超过合闸开关(或断路器)两侧的待并系统与运行系统中容量较小一侧的发电机总额定电流的100%。

- (4) 自动准同步应考虑采用正差频合闸的原则。

- (5) 发出同步合闸指令的超前时间或超前相角应在一定范围内可调。以适应不同动作时间的合闸开关(或断路器)。超前时间的整定范围一般可取0~0.3s;超前相角的整定范围一般可取0°~36°。

- (6) 允许发出同步合闸指令的待并系统与运行系统之间的频率差和电压差应在一定范围内可调,以满足不同的使用要求。

- (7) 允许频率差的整定范围一般时取0.15~0.5Hz、允许电压差的整定范围一般可取额定电压的±(3%~10%)。

- (8) 当待并系统与运行系统之间的频率差或电压差大于预先整定的允许差值时,应有可靠的合闸指令闭锁措施。

- (9) 当待并系统与运行系统之间的频率差绝对值小于等于3Hz时,应能对待并系统自动进行加速(增频)或减速(减频)。

- (10) 当待并系统与运行系统之间的频率绝对值小于0.1Hz时,应能自动发出呆滞扰动信号,以改变滞留较长时间的同步而不同位相的状态,提高同步合闸的快速性。

- (11) 当采用超前时间方案时,发出同步合闸指令的超前相角整定值应尽可能与各受控并联合闸开关(或断路器)的平均动作时间(t_m)相等。

- (12) 当采用超前相角方案时,发出同步合闸指令的超前相角整定值应尽可能等于 $360^\circ \times t_m \times \Delta f_z$ (其中 Δf_z 为整定的同步合闸允许频率差)。

- (13) 两个不同电站的带电汇流排之间通过跨接开关并

车时,跨接开关的并车原则是:当两个电站均为单机运行时,以优先级侧的汇流排为运行系统,而另一侧汇流排为待并系统;当两个电站一个为多机运行,一个为单机运行时,以多机侧汇流排为运行系统,单机侧汇流排为待并系统;当两个电站均为多机运行时,应有自动限制跨接开关并车的功能,不允许在此状态并车。

(14) 对于主电站容量足够大的舰船,应具有自动限制并联发电机组台数的功能,以防止出现有关断路器工作在断流容量不足的不安全状态下。

(15) 自动同步合闸失败,监控装置应发出声、光报警,并向下序备用机组发出启动信号。

4.1.6 自动调频调载

(1) 监控装置的自动调频调载环节对电网的频率偏差应能进行自动调整。当从主汇流排上引出功率因数为0.6~0.9(滞后),负载程度为空载至满载,负载变化方式为平缓变化或急剧变化的三相平衡负载时,应能将电网的稳态频率自动限制在 (50 ± 0.5) Hz的范围内。

(2) 规格、型号和功率相同的交流发电机组在稳定并联运行时,当负载在总额定功率20%~100%和功率因数在0.6~0.9滞后范围内变化时,监控装置在进行自动调频调载时应保证每台机组有功功率分配差度不大于该台机组额定有功功率的 $\pm 5\%$ 。

(3) 规格、型号和功率不同的交流发电机组在稳定并联运行时,当负载在总额定功率20%~100%和功率因数在0.6~0.9滞后范围内变化时,监控装置在进行自动调频调载时应保证每台机组有功功率分配差度不大于该台机组额定有功功率的 $\pm 10\%$ 。

(4) 对于旨在减小电网频率和并联运行有功分配持续误差的只起辅助调节作用的自动调频调载环节,应采取必要的延时和动态阻尼措施,以避免原动机调速器的调节过程和避免因负载波动而导致的多余无效的调节;还应根据电网频率和并联运行有功分配的允许误差,设置一定的调节不灵敏区,以免调节过程过于频繁。

(5) 当电网的频率超出允许变化范围(过高或过低)且持续一定时间之后,起辅助调节作用的自动调频调载环节应能同时调整供电的所有发电机组的转速(减速或加速)。

(6) 当并联运行发电机组的有功功率分配差度超过规定的允许值且持续一定时间之后,起辅助调节作用的自动调频调载环节应能同时合理地调整有功分配超差的各台发电机组的油门(或汽门)使有功分配趋于均衡。

(7) 自动调频调载环节发出的调速脉冲的宽度或重复频率应随着频率和有功分配超差程度的增大而增大,并应与被调发电机组的转动惯量相适应,以保证调节控制的快速性和稳定性,其调节增益一般应在一定范围内可调。

4.1.7 重载询问

(1) 在起用大容量的用电设备之前,应先自动询问一下电站中现时供电的发电机组是否能满足它们的用电和启动要求,若能够满足时,则允许它们马上起用;若不能满足时,则应先自动启动一台备用发电机组,待其建压并网并经确认电站的现时功率裕量足够时,才允许它们接入电网用电。

(2) 一般应将额定功率大于等于主发电机单机额定功率15%~20%的负载视为大容量用电负载。

(3) 若电站具有自动增机功能,则在进行重载询问判断电站现时供电发电机的功率贮备是否能满足大容量用电设备的用电要求时,应使大容量用电设备起用后的电站总负载量

不超过重载判断条件中的临界值。在无备用发电机组可用的情况下,应自动解除上述要求。

(4) 若需要进行重载询问的大容量用电设备不止一个,则在某一容量用电设备正在进行重载询问时,应对其他大容量用电设备重载询问通道实施闭锁(或记忆性闭锁),并根据设定的优先级排序,直到先行询问的大容量用电设备接入电网稳定运行后才能解除这种闭锁,再根据优先级次序进行处理,以避免两个或两个以上大容量用电设备的同时起用。

(5) 对于启动冲击电流大于主发电机单机额定电流的50%而且与电站主汇流排之间未采取有效隔离措施(如变流机组)的特大容量用电设备,除了应满足上述(2)和(3)条要求外,还应确保在其启动时,并联供电发电机的总额定电流大于其启动冲击电流的2倍。

4.1.8 自动分级卸载

(1) 当电网在线负载的总用电量超过供电发电机的额定输出能力,并持续一定的时间之后,应能自动将在线负载中的次要负载以一次或分作几次的方式从电网退出,以确保对重要负载的连续供电。

(2) 监控装置的自动分级卸载环节若采用分作几次的方式卸除次要负载,则应根据被卸负载的相对重要性,安排它们从电网退出的先后顺序。

(3) 当发电机发生单相或两相持续过载时,监控装置的自动分级卸载环节也应能发出卸除次要负载的指令。

(4) 通常可取发电机输出电流的过载信号作为自动分级卸载环节的输入信号。自动分级卸载环节的过载——卸载工作特性应与发电机断路器的过载保护特性相匹配,在同一过载信号下,自动分级卸载环节的卸载延时应比发电机断路器的脱扣延时至少短3s。

4.1.9 发电机自动解列的其他要求

(1) 在并联运行发电机组轻载解列顺序的选择上,可按设定的发电机组启动顺序,采用后行机组先行解列的原则,也可采用先行机组先行解列的原则。根据需要,还可设置解列顺序的设定装置,但应采取措施使得在任意一台机组正处于解列过程中时这种人为的设定不能生效。

(2) 若对供电发电机组的故障处理功能及轻载解列功能同时发生,则应先处理故障机组解列,然后再行处理轻载解列。

(3) 若电网发生频率过高或过低的异常情况,且判断出现这些异常情况的整定界限值与正常情况发电机电空频率或电压的最大可能偏差值小于或等于自动同步允许的频率差值或允许发出自动同步合闸指令的电压差整定值,则应在备用机组实现自动启动、加速建压和并网之后,才向供电发电机组发出自动解列指令,但此时备用机组实现建压后的并网时间不应超过预计的自动同步所需的最长时间。

(4) 供电发电机组接到自动解列指令后,应将其承担的负载自动转移给其他供电机组,然后自动分闸退出并联运行。通常应在待停发电机组的负载转移至剩余负载不超过该发电机组额定输出功率的5%时,才向其开关(或断路器)发出分闸指令。

4.1.10 自动停机的要求

(1) 发电机组应设置必要的独立的安全保护系统,如超速停机、滑油压力过低停机、防止意外启动装置等。安全保护系统应由独立分路供电。

(2) 故障机组在故障排除前,不允许机组自动重新启动。

4.1.11 系统功能选择性

船舶电站控制系统的功能在设计中是可选择的、可剪裁和可组合的,按船舶的研制总要求可以构成全自动电站或半自动电站。

4.2 参数设定与调整

控制系统中各参数的设定应当与系统的被控设备(包括机组、配电板等)的性能相适应,并满足于系统的总体要求。

系统参数一般包括以下几种:

- (1) 时间参数,如机组的起动时间、投网时间、配电板主开关动作时间等。
- (2) 控制参数,如电压越限的百分比,功率原则增机的百分比等。
- (3) 性能参数,如系统显示精度、调频调载精度等。
- (4) 系统参数应当能够方便的调整,以满足系统调试的需求,适应系统设备在实际使用过程中性能的变化。

4.3 试验

应该根据系统规格书对控制系统的试验编写试验大纲,试验大纲应该至少包含以下几方面的内容:

- (1) 监控系统各装置的外观检查。
- (2) 监控系统各装置的绝缘电阻检查。
- (3) 监控系统各装置的环境适应性试验。
- (4) 监控系统的电磁兼容性试验。
- (5) 监控系统各装置的电源波动试验。
- (6) 监控系统的功能试验。

4.4 使用和维护

对于系统的使用和维护应当编写使用和维护手册,手册应至少包含以下几方面的内容:

- (1) 系统对使用环境的要求。
- (2) 系统原理、功能、性能与组成。
- (3) 系统的具体操作规范。
- (4) 系统常见故障的检查排除方法。

4.5 技术发展趋势

随着计算机技术、通信技术和控制技术的发展,传统的工业控制领域正经历着一场前所未有的变革,开始向网络化方向发展。控制系统的结构从最初的 CCS(计算机集中控制系统),到第二代的 DCS(分散控制系统),发展到现在流行的 FCS(现场总线控制系统)。对诸如图像、语音信号等大数据量、高速率传输的要求,又催生了当前在商业领域风靡的以太网与控制网络的结合。这股工业控制系统网络化浪潮又将诸如嵌入式技术、多标准工业控制网络互联、无线技术等多种当今流行技术融合进来,从而拓展了工业控制领域的发展空间,带来新的发展机遇。

4.5.1 现场总线技术

现场总线是连接智能现场设备和自动化系统的全数字、双向、多站的通信系统。主要解决工业现场的智能化仪器仪表、控制器、执行机构等现场设备间的数字通信以及这些现场控制设备和高级控制系统之间的信息传递问题。

现场总线的特点:

- (1) 现场控制设备具有通信功能,便于构成工厂底层控制网络。
- (2) 通信标准的公开、一致,使系统具备开放性,设备

间具有互可操作性。

(3) 功能块与结构的规范化使相同功能的设备间具有互换性。

(4) 控制功能下放到现场,使控制系统结构具备高度的分散性。

现场总线的优点:

- (1) 现场总线使自控设备与系统步入了信息网络的行列,为其应用开拓了更为广阔的领域。
- (2) 一对双绞线上可挂接多个控制设备,便于节省安装费用。
- (3) 节省维护开销。
- (4) 提高了系统的可靠性。
- (5) 为用户提供了更为灵活的系统集成主动权。

4.5.2 嵌入式系统

嵌入式系统是指以应用为中心,以计算机技术为基础,软件硬件可剪裁,适合应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。它主要由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户应用软件等部分组成,用于实现对其他设备的控制、监视和管理等功能。

自嵌入式技术出现以来,其发展大致经历了四个阶段:第一阶段是以单芯片为核心的可编程控制器形式的系统;第二阶段是以嵌入式 CPU 为基础、以简单操作系统为核心的嵌入式系统;第三阶段是以嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统;第四阶段是以 Internet 为标志的嵌入式系统。嵌入式系统的核心部件是各种类型的嵌入式处理器。嵌入式系统的软件经历了两个发展阶段,一是主要以汇编语言编制成的软件,二是嵌入式实时操作系统 RTOS。而以 VxWorks、Nucleus、WindowsCE 等为代表的嵌入式实时操作系统现在已在嵌入式系统中占据了主流软件的地位。

嵌入式技术在工业控制网络中的应用现状与优势:

(1) 随着现场总线技术的发展,尤其是工业以太网的日渐兴起,将网络功能与嵌入式系统结合,使诸如变送器、执行器等终端设备具备网络功能,使现场设备能够直接上网成为一种必然趋势。目前实现嵌入式控制设备连网的方案有:

- 1) 将一个小的 WEB 服务器作为 RTOS(嵌入式实时多任务操作系统)的一部分,使现场设备具有 WEB 功能。
- 2) 采用高速微处理器,如 DSP 等,在单片机系统上实现 WEB 功能。

(2) 片上系统集成 SoC(System on Chip)是当前电子技术发展热点,也是嵌入式系统发展的一种最新形式。

由于技术的可行性和广阔的发展前景,国际上已普遍开始进行这方面的研究工作,并推出了相关产品。美国 GE 公司将以太网接口做在保护装置中,GE—HARRIS 公司推出了带双以太网接口的 D95 测控单元装置,ABB 公司也推出了带以太网接口的间隔控制器 R580。美国 ConnectOne 公司、Philips 公司、emWare 公司、TASKING 公司和国内的 P&S 公司等均提供基于 Internet 的 Device-Networking 的软件、固件(Firmware)和硬件产品。OPT022 公司应用嵌入式 Internet 技术,研制开发了“以太网 I/O 系统”——SNAPEthernet I/O 系统,通过 Internet 对分布在现场的 I/O 进行访问,从而实现对远程设备的监测和控制。

将网络功能嵌入终端设备中,使其可直接通过 Internet/Intranet(企业内部网)进行网络通信、数据交换,实现远程组态、参数修改等。并且减少了诸如网关、代理服务器等中间环节,简化了网络结构,降低了安装、维护的难度和成

本。同时现场设备通信速率和通信信道的利用率大大提高,可直接传送图像信息、多媒体信息,满足了工业控制系统的高要求。实行“e”网是工业控制网络必然的发展趋势,而可实现最底层设备直接融入网络的嵌入式技术必将获得长足的发展。

5 安全系统的设计和试验

5.1 功能和参数

电站的安全系统(或装置)是用来保护电站的,通过对电站运行过程中各热工、电气参数的检测与判断,当电站控制和监测系统在运行过程中失效或发生危及电站系统内各主要设备的故障时,安全系统应能自动产生保护性动作:

(1) 立即停止运行,如运行机组紧急停车,紧急切断该设备的控制系统等,除非人工复位,该设备不允许投入工作。

(2) 把该设备暂时调节到可以勉强运行状态,如卸除机组的负载,断开发电机主开关(或断路器)等。

(3) 当安全系统动作时,应在对应的机旁信号采集站或控制柜(台)上发出声光报警。并显示安全系统的动作原因。

(4) 安全系统应独立于控制系统和监测系统。

5.1.1 对电站一般故障的处理能力

(1) 电网电压或频率持续过高或过低。

(2) 柴油机滑油压力较低(若原动机为柴油机时)。

(3) 柴油发电机组冷却水出口温度过高或冷却空气温度过高。

(4) 进燃气轮机和进减速齿轮箱的滑油压力低。

(5) 燃气轮机排气温度高。

(6) 进汽轮机和进减速齿轮箱的滑油压力低。

(7) 汽轮机冷凝器真空度低。

(8) 汽轮机转子轴向位移过大。

(9) 发电机绕组温度高。

当发生上述一般故障的任一项时,处于备用状态的发电机组应立即起动,自动同步投入电网运行;当并网成功后,发生上述一般故障的发电机组应自动将负荷降低至不大于额定功率的20%(即转移负载)时,自动脱离电网。

发生一般故障中的任一项时,控制系统应发出相应的声光报警信号。故障应予记忆,故障消除后信号自动消失,但“滑油压力低”故障信号必须在排除后人工复位。

5.1.2 对电站严重故障的处理能力

(1) 电网失电压。

(2) 柴油机滑油压力过低。

(3) 发电机组超速。

(4) 进燃气轮机和进减速齿轮箱的滑油压力过低。

(5) 燃气轮机燃烧室火焰熄灭。

(6) 燃气轮机振动过度。

(7) 进汽轮机和进减速齿轮箱的滑油压力过低。

(8) 汽轮机转子轴向位移极大。

当发生上述严重故障时,处于备用状态的发电机组应立即自动起动,并自动投入电网运行;同时,发生上述严重故障的机组应立即自动从电网切除,并自动停机。

5.2 参数的设定与调整

系统的数据参数即为其传感器件的参数,包括热工参数和电器参数,其精度参数也与传感器件的精度参数有关。

其控制参数的设定,如柴油机滑油压力过低的报警值应当根据设备的要求设定,并在实际使用过程中加以调整。

6 监测报警系统的设计和试验

6.1 设计依据

确定设计过程的理论基础,根据有关技术规格数、技术要求和技术指标,确定系统各功能指标、环境条件等要求。

6.2 设计准则

(1) 设计应符合供货合同或技术规格书的规定。

(2) 在可靠第一的情况下,优先采用成熟先进技术。

(3) 在设计中观测标准化,系列化,通用化,模块化。

(4) 选用设备(材料,元器件)的原则:优先选用船用产品,如没有时允许选择用户认可的陆用产品;电子元器件尽量通过老化筛选。

6.3 可靠性原则

在设计中应充分考虑可靠性原则。可靠性要求见第1章3.6条。

6.4 设计内容

(1) 传感器选用。

(2) 系统硬件设计。

(3) 应用程序设计。

(4) 结构设计。

6.5 设计方法

6.5.1 监测报警系统的硬件设计

(1) 根据系统要求,确定输入、输出参数和数量。

(2) 确定系统供电型式、容量和型号。

(3) 确定按钮、指示灯、发光数码管、显示器等配套器件的型号。

6.5.2 监测报警系统的自检功能

当监测报警系统自身发生故障时,应能进行报警或进行故障定位指示或代码显示,自检对象有传感器、声光报警设备、计算机软件和硬件。

6.5.3 监测报警系统的报警

(1) 监测报警系统的故障报警信号应与火警、电话信号及其他正常信号有明显的区别。

(2) 监测报警系统应能对同时发生的所有故障发出报警信号,任何一个报警信号应不妨碍其他报警信号的识别和接收。

(3) 监测报警系统的报警信号应同时发出声、光信号。

(4) 监测报警系统应设有报警应答装置,但应答后不影响后来的报警信号出现、接受和处理。应答后声响信号消失。光报警信号应为闪光信号,应答后,闪光信号应转为平光信号,并保留到故障消除,故障消除后报警通道应能自动恢复到正常工作状态。

(5) 光报警信号应符合GB 9193—2005《船舶声光报警信号和识别标志》的相关规定。

(6) 监测报警系统应具有在应答前使报警信号予以锁定的功能,以便对自行纠正的瞬时故障进行查找。

(7) 为了防止设备正常起动和停止过程中控制参数偏离正常值而造成频繁的误报警,应有必要的报警锁闭措施。

(8) 某些检测点在设备运行中会产生瞬时波动,但并不

影响其正常运行，这时报警点应考虑必要的延时防抖措施。

6.5.4 监测报警系统的显示

(1) 监测报警系统的运行参数可用仪表、显示器等进行显示。参数可单独显示，也可用图形显示，采用计算机的监测报警系统应能在计算机的显示屏幕上自动显示被测参数的编号、名称、测量值、单位等参数。

(2) 显示和报警。监测报警系统在集控台上的显示和报警项目可以参照表 3.6-1~表 3.6-5。

表 3.6-1 柴油机监测报警系统

序号	项 目	显 示	报 警	备 注
1	滑油进机压力	压力	低	—
		—	过低	自动紧急停机
2	滑油出机温度	温度	高	—
3	冷却水出口温度	温度	高	—
4	转速	—	超速时	自动紧急停机
5	起动空气压力或起动蓄电池电压	压力或电压	低	—
6	控制系统动力（电压或气压或液压）	—	失效	—

表 3.6-2 汽轮机监测报警系统

序号	项 目	显 示	报 警	备 注
1	滑油进机（及减速齿轮箱）压力	压力	低	—
		—	过低	自动紧急停机
2	轴承滑油温度	温度	高	—
3	冷凝器真空度	真空度	低	—
4	冷凝器真空度	—	过低	自动停机
5	转子轴向位移	—	过大	自动紧急停机
6	转速	—	超速时	自动紧急停机
7	控制系统动力（电压或汽压或液压）	—	失效	—

表 3.6-3 燃气轮机监测报警系统

序号	项 目	显 示	报 警	备 注
1	滑油进机（及减速齿轮箱）压力	压力	低	—
		—	过低	自动紧急停机
2	动力涡轮进口或出口燃气温度	温度	高	自动紧急停机
3	燃气室火焰	—	熄灭	自动紧急停机
4	转速	—	超速时	自动紧急停机
5	燃气轮机振动	—	过度	自动紧急停机
6	控制系统动力（电压或汽压或液压）	—	失效	—

表 3.6-4 发电机监测报警系统

序号	项 目	显 示	报 警	备 注
1	定子绕组温度	温度	高	—
		—	过高	自动停机
2	冷却空气温度	温度	高	—
3	空气海水冷却器	—	漏水	—
4	轴承温度	温度	高	—

表 3.6-5 配电系统监测报警系统

序号	项 目	显 示	报 警	备 注
1	电压	电压	高	—
		—	低	—
2	频率	频率	低	—
3	对地绝缘	—	低	—

6.5.5 监测报警系统的打印

监测报警系统根据要求可设有打印和记录功能，以便对被测参数进行打印和记录，并对被测参数的越限情况进行登记。

6.5.6 程序设计

程序设计应优先选用模块化、结构化方式。

6.5.7 可编程控制器（PLC）程序设计

- (1) 根据选用的 PLC，确定编程软件。
- (2) 编写系统结构化流程图。
- (3) 编写整套程序，优先选用梯形图编程，并进行必要的注释。
- (4) 程序调试，参数整定与修正。
- (5) 打印程序成册。

6.5.8 计算机程序设计

- (1) 确定编程语言，根据需要可采用 C/C++ 等高级语言。
- (2) 编写程序流程图。
- (3) 编写整套程序，并进行必要的注释。
- (4) 程序调试，参数整定与修正。
- (5) 打印程序成册。

参 考 文 献

- [1] 中国船舶工业总公司. 船舶设计实用手册. 电气分册. 北京: 国防工业出版社, 1997
- [2] 王建华主编. 电气工程师手册. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [3] 机械工程手册. 电机工程手册编辑委员会. 机械工程手册: 第13卷 机械产品(三). 北京: 机械工业出版社, 1982
- [4] 电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 1996
- [5] 施仲簏, 杨承参, 施润华. 轮机学. 上海: 上海交通大学出版社, 1988
- [6] 张立, 赵永健. 现代电力电子技术. 北京: 科学出版社, 1992
- [7] 许实章. 电机学. 北京: 机械工业出版社, 1991
- [8] 施亿生, 谢绍惠编. 船舶电站. 第1版. 北京: 国防工业出版社, 1981
- [9] 苏石川, 元广杰, 杨宗明主编. 现代柴油发电机组的应用与管理. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [10] 查全性. 化学电源选论. 第1版. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- [11] 郭炳琨, 李新海, 杨松青. 化学电源——电池原理及制造技术. 第1版. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000
- [12] 徐品第, 柳原. 铅酸蓄电池——基础理论和工艺原理. 第1版. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1996
- [13] 朱松然. 铅蓄电池手册. 第1版. 天津: 天津大学出版社, 1998
- [14] 吴宇平, 戴晓兵, 马军旗, 程预江. 锂离子电池——应用与实践. 第1版. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [15] 李瑛, 王林山. 燃料电池. 第1版. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- [16] 李建保, 李敬峰. 新能源材料及其应用技术. 第1版. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [17] 胡庆生. 现代电气工程实用技术手册: 第八篇 低压电器及低压开关设备. 机械工业出版社, 1994
- [18] 郑铭其. 低压电器选用维修手册. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [19] 李茂林. 低压电器及其成套设备选用手册. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1988
- [20] 中国船级社. 钢质海船入级与建造规范. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [21] 王兆安, 张明勋主编. 电力电子设备设计 and 应用手册. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [22] [美] Muhammad H. Rashid 主编. 电力电子技术手册. 陈建业, 杨德刚等译. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [23] 陈道炼编著. DC-AC 逆变技术及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [24] 张皓, 续明进, 杨梅编著. 高压大功率交流变频调速技术. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [25] 陈坚编著. 电力电子学-电力电子变换和控制技术. 北京: 高等教育出版社, 2002
- [26] A. P. Karpinski, B. Mkovetski, etc. Silver-zinc: status of technology and applications. Journal of Power Sources, 1999, 80: 53-60
- [27] Colin A. Vincent, Lithium batteries: a 50-year perspective, 1959-2009, Solid State Ionics, 2000, 134: 159-167
- [28] Toshikatsu Tanaka, Kazuhiro Ohta, Noboru Arai, Year 2000 R&D status of large-scale lithium ion secondary batteries in the national project of Japan. Journal of Power Sources, 2001: 2-6
- [29] Bruno Scrosati, Recent advances in lithium ion battery materials. Electrochimica Acta, 2000, 45: 2461-2466

第4篇 船舶电力系统

主编单位：海军工程大学

上海海事大学

主 编：张晓锋 夏 立 沈 兵 许晓彦

编写人员：张晓锋(海军工程大学)

夏 立(海军工程大学)

沈 兵(海军工程大学)

许晓彦(上海海事大学)

薛士龙(上海海事大学)

李杰仁(上海海事大学)

庄劲武(海军工程大学)

付立军(海军工程大学)

李红江(海军工程大学)

叶志浩(海军工程大学)

《说文解字》

《说文解字》是东汉许慎所著的一部文字学著作，系统分析了汉字的构造和演变。全书共收录小篆文字九千三百五十个，按部首排列，共五百四十部。其核心在于“六书”理论，即象形、指事、会意、形声、转注、假借。许慎通过拆解字形，揭示了每个字的本义和引申义，为后世研究汉字提供了坚实的基础。此书不仅是文字学的经典，也是研究古代文化、历史和语言的重要工具。



第1章 船舶电力网络

1 船舶电力系统及网络结构

船舶电力系统是电源、配电网和用电负载所组成的完整体系的总称。电力系统的电源通常采用发电机组（直流或交流）或蓄电池组。为便于管理，系统的发电机组常集中布置在一个或几个舱室中。这些集中布置的发电机组，包括它们的控制、配电板及辅助装置称之为电站。配电网包括供电电缆、电线、配电器械。由电力变换器（如变压器、变频器、变流机组和整流器等）所得的电能通常被看作系统的二次电源。系统的用电负载即船舶上各种电气设备。用电负载对系统供电可靠性和品质指标的要求会对电力系统的结构和组成产生很大的影响，但除了与电力系统关系密切的电力推进外，一般负载的内容并不属于电力系统研究设计的范围。简单的船舶电力系统组成如图 4.1-1 所示。

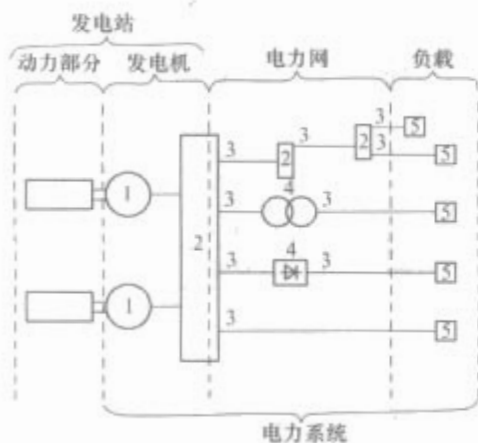


图 4.1-1 船舶电力系统示意图
1—电源；2—配电板；3—输电导线；
4—变换器；5—负载

1.1 船舶电力系统的基本要求

(1) 船舶电力系统能在各种工况下完成其担负的任务，是对船舶电力系统的基本要求，即系统能以规范规定的品质向全船舶电力负荷连续供电。这包括以下几点：

1) 确保为保持船舶处于正常工作状态并满足船员正常生活条件所需的所有电气设施的供电，而不求助于应急电源。

2) 确保在各种紧急状态下，向保证船舶安全所需要的重要电气设备供电。

3) 确保船员及船舶设备的安全，免受电气事故的危害。

为此，对系统相关设备应采用可靠而先进技术；要求有最佳费用效益；贯彻统一和互换原则；选用船用设备以及体积小、质量轻、结构简单、耐用、使用方便等。

(2) 船舶电力系统供电生命力要求必须和船舶总体的抗沉性相适应。当船舶遭受损害而仍保持不沉时，剩余发电站和配电网的供电能力必须保证维持船舶机动性，必要的船舶生命力和最低限度的自身能力所必须的重要负载的供电，即要求系统及相关设备具有抗损坏的能力。对大中型船舶可设置事故电力网络，临时拉敷软电缆向电力系统遭受损害部

位的重要设备供电。

船舶电力系统的预期工作寿命应与船体设计使用寿命一致。对水面船舶电力系统中的发电机组、主配电板、负载中心（区配电板）和电缆线路等主要设备，预期工作寿命应与船体设计使用寿命相当。

(3) 船舶电力系统的可靠性应满足技术指标书中规定的出航可能性和任务可靠性要求。除去各类计划修理时间和航行检修时间外，电力系统功能正常，可以保证正常航行并且技术状态良好的时间比率，用可用度 A_0 表示，即

$$A_0 = \frac{\text{系统可执行任务时间}}{\text{系统可执行任务时间} + \text{故障修理时间(含等待时间)}}$$

电力系统可用度 A_0 应大于 0.98。

(4) 对系统维修性要求主要包括以下几个部分：

- 1) 应具有良好的可达性。
- 2) 应提高标准化和互换性程度。
- 3) 应具有完善的防差错措施及识别标记。
- 4) 应保证维修安全。

为达到船舶电力系统安全性的要求，应采用一切必要措施，识别并减少、消除危险，减少风险，保证在寿命周期的所有阶段都能获得最佳的系统安全，这些措施包括：

- 1) 采用最小风险设计。
- 2) 采用安全装置—使用安全装置（固定的、自动的等）将风险控制到可接受的程度。
- 3) 采用报警装置—测出险情并及时发出报警信号，以便采取措施，制止险情发展。
- 4) 建立防护措施、规程或实行培训制度。

(5) 船舶电气设备的工作条件比陆地恶劣得多，环境条件对电气设备的运行性能和工作寿命有严重影响。例如环境温度高时，会造成电动机出力不足，绝缘加速老化。相对湿度高则会使电气设备绝缘受潮、发胀、分层及变形等，使绝缘性能降低，并且会使金属部分加速腐蚀，镀层剥落。盐雾的存在，霉菌的生长和油雾及灰尘粘结，都会使绝缘下降，工作性能受到影响。此外船舶受到严重冲击和振动时，也会造成设备损坏、接触不良或误动作。因此船舶用电气设备必须满足船用条件的要求。

1.2 船舶电力系统的类型

各种类型船舶的任务使命、总体布置、动力配备、供电要求不尽相同，它们的电力系统形式也有很大的差异。常见的电力系统构成方式有以下几种类型。

1.2.1 单电站电力系统

这种船舶电力系统只设置一个发电站，常用于较小型的内河或沿海船舶。单电站电力系统中常设置两台以上的发电机组，以便在检修或一台发电机组发生故障时交替使用，其单线示意图如图 4.1-2 所示。

1.2.2 主辅(或应急)电站电力系统

这种电力系统除了配备主电站保证船舶正常运行工况下各种用电设备的供电外，还设置辅助电站(停泊电站等)或应

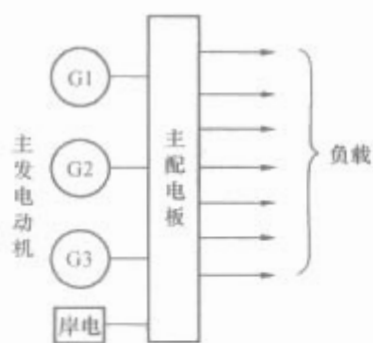


图 4.1-2 单电站电力系统

急电站，用来保证船舶处于低负荷、应急或其他特殊工况下部分电气设备的供电，其单线示意图如图 4.1-3 所示。

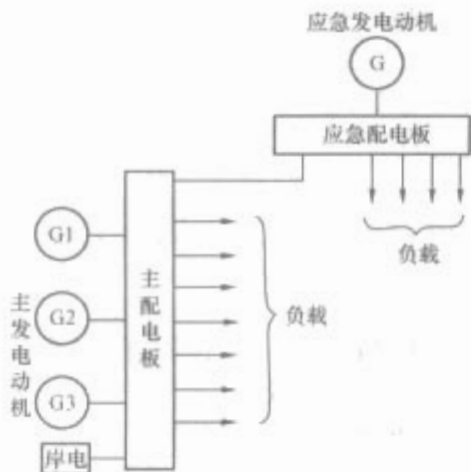


图 4.1-3 主辅(或应急)电站电力系统

主辅(或应急)电站电力系统常用于各种民用船舶和军用辅助船舶。

1.2.3 多电站电力系统

系指船舶上设有两个以上主电站的电力系统，大型的航空母舰上有时甚至设置八个电站。这些电站分散布置在船舶比较安全的部位，保证电力系统具有较高的供电可靠性和生命力。这种系统常用于战斗船舶、核动力船或其他对供电可靠性有较高要求的船舶上，其单线示意图如图 4.1-4 所示。

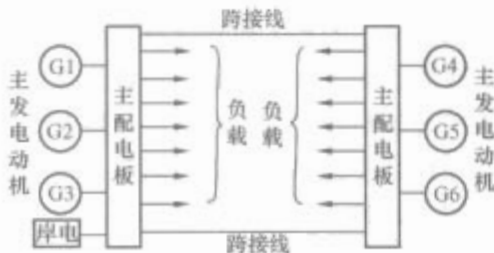


图 4.1-4 双电站电力系统

1.2.4 利用推进动力装置余能发电的电力系统

这是近年来发展起来的一种节能型电力系统。它除了有通常的柴油发电机组外，还配备有利用主机余能发电的轴带发电机或利用主机排出废气发电的废气涡轮发电机。当主机持续工作时，主要依靠节能发电机组提供全船所需的电力，运行十分经济，应用也日趋广泛。其单线示意图如图 4.1-5 所示。

1.2.5 交直流混合电力系统

这是一种交流发电机组和直流蓄电池混合构成的电力系统。主要用于潜艇等特种船舶。它可以在蓄电池中储存电能，有较高的供电可靠性。根据船舶主要用电设备是交流还是直流，又可分为交流供电方案和直流供电方案，其单线示意图见图 4.1-6。

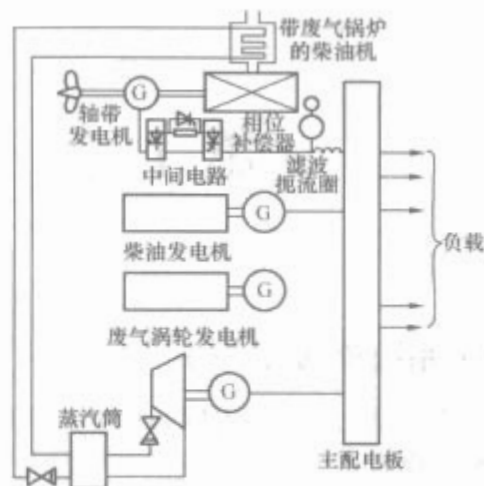


图 4.1-5 利用推进动力余能发电的电力系统

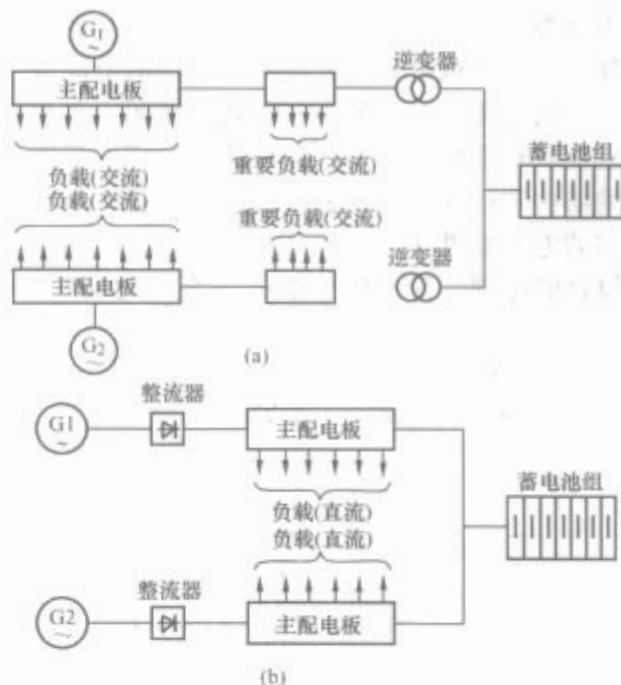


图 4.1-6 交直流混合电力系统
(a)交流供电方案；(b)直流供电方案

1.2.6 直流电力推进联合电力系统

这是柴油机直接驱动常规潜艇早期应用较多的一种电力系统，既可由蓄电池供电，也可由推进发电机供电，见图 4.1-7。

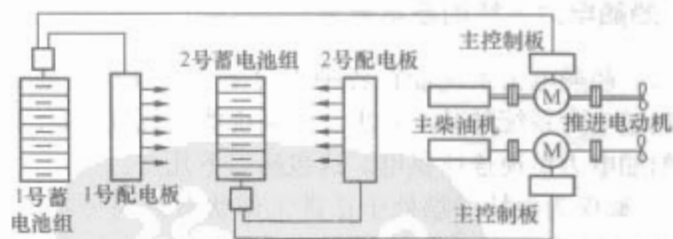


图 4.1-7 直流电力推进联合电力系统

1.2.7 交流电力推进联合电力系统

电力推进的船舶，如破冰船、工程船舶等常采用推进和供电联合起来的电力系统。这样的电力系统具有更大的经济性和机动性，其单线示意图如图 4.1-8 所示。

1.2.8 综合电力系统

综合电力系统是指采用电力系统集成技术来实现船舶电能的产生、输送、变换、分配以及利用，以满足船舶推进、日用负载、大功率脉冲负载等负荷的需要。它将船舶发供电与推进用电、船载设备用电集成在一个统一的系统内，从而实现发电、配电与电力推进用电及其他设备用电统一调度和集中控制。其系统参见图 4.1-9。

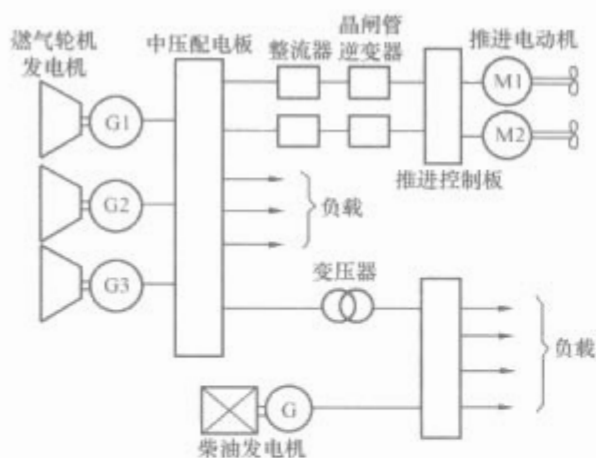


图 4.1-8 交流电力推进联合电力系统

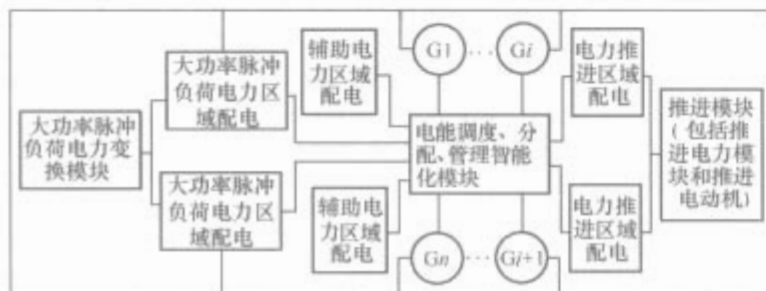


图 4.1-9 综合电力系统

1.3 船舶电力系统特点

由于船用负载的特点与陆地有很多不同，使得船舶电力系统在电站容量、连接方式、电压等级、变送电装置等部分与陆上电力系统有很大差别，与其相比，船舶电力系统的特点主要表现在如下几个方面：

(1) 电站容量和类别。由于船舶电站只供电给一条船上负载的需要，因此其单容量和系统容量与陆地相比要小得多。目前我国船舶电站单容量多不超过 5MW，装机总功率多不超过 30MW。为了使管理维护方便，一条船上发电机组的型式、容量大多采用相同的类型。

由于船舶电站容量小、单机容量与某些大的船用负载可相比拟，当大的电动机起动时，对电网将造成较大的冲击，因而对船舶电力系统的稳定性提出了较高的要求。如要求船用发电机励磁调节器动作时间要快，有强励能力，发电机有较大承受过载能力等。

由于船舶是海上独立活动单元，为在各种工况下，如航行、作业、停泊、应急等情况都能连续、可靠、经济、合理地进行供电，船上常常是用配置多种电站的方法来满足这一要求。

船舶电站的种类主要有如下几类。

- 1) 主电站。是在正常情况下向全船供电的电站。
- 2) 停泊电站。是在停泊状态、或无岸电供电时向停泊时的用电负载供电的电站，一般容量较小。
- 3) 应急电站。是在应急情况下，向为保证船舶安全所必需的负载供电的电站。
- 4) 特殊电站或专用电站。如有的船舶需要 400 ~ 1000Hz 的中频电站供电给专用设备。

(2) 发配电装置和电力网。船上从维护管理可靠、安全、经济、优质及系统容量较小等方面考虑，主要采用低电压等级的发配电设备及各种类型的电缆供电给负载。另外，由于船舶容积的限制，电气设备比较集中，发电设备和用电设备之间距离较短，电网长度不大并都采用电缆，所以发电机和电力网的保护模式较少，一般只设置有保护发电机外部故障的短路及过载保护，电力网保护通常和发电机保护采用

一套装置。

但是，正因为船舶电力系统的电压等级较低、电缆线短，使得发电机、电缆线路、断路器和配电板上的额定电流、事故电流都相对很大，造成这些设备常处在其热效应和电动力效应的边界状态，因而降低了安全裕度。

(3) 船舶电气设备的工作条件比较恶劣，如环境温度较高（在赤道附近，机舱温度高达 50℃ 以上）；相对湿度较大（有时高达 95%）；存在盐雾、霉菌、油雾，使导电金属受到腐蚀，并使绝缘材料性能降低；船舶的摇摆（横摇 22°/2）、倾斜（长期横倾 15°~22°，纵倾 10°）、振动（波浪冲击、往复式机器运转、螺旋桨运转等引起的）影响电气设备动作的可靠性和正确性。

1.4 船舶电力网络结构

1.4.1 基本要求

(1) 电网供电应具有高度的可靠性和生命力，即当发电机组或线路局部发生故障损坏时，电网能限制故障范围，继续在大范围内维持供电的能力；电网严重破坏时，继续保持最重要设备不间断供电的能力。

1) 从供电可靠性角度考虑，对每项用电负载应采用多路供电，其中一路电源为正常电源，其他为备用电源。每路电源应是独立的。所谓独立电源是指不同电站，或不同发电机屏间有隔离开关时配电板的每个独立分段。

设计网络结构时，要考虑电力负载的重要性等级，一般可将负载分为三级：

- a. 直接关系到船舶生命安全的极重要负载。
- b. 关系到船舶使命任务的重要用电设备。
- c. 不影响船舶活动的一般性负载。

第一级负载的供电不能中断，它包括以下几种类型：①影响船舶航行操纵的负荷，如操舵装置及其辅助设备；②关系人员安全的通风装置，船舶动力装置冷起动和机械保护所必须的设备；③应急照明和航行信号识别灯；④船内通信设备；⑤损管有关的器械设备；⑥应急发电机原动机的辅助保障设备。

第二级负载包括：①动力辅助设备；②船舶重要的管路系统；③观察、通信、导航电子设备。

第三级负载包括电池充电设备、生活空调设备、锚机系统缆设备、修理机械等。

一级和二级用电设备应保证有两个独立电源的两舷供电。一路为正常电源，另一路为备用电源。备用电源可以是另一主电站（或主发电机），也可为应急电站。有应急电站时，部分一级负载还可考虑采用三路供电（正常、备用和应急电源）。三级用电设备则可以仅由一个电源单路供电。如果船舶设置应急发电机和应急电网，应首先保证一级设备的供电，应急发电机容量有富裕时，再依重要性次序向三级设备供电。

2) 为提高供电生命力，船舶电网上可采取开关隔离的方式，在功能工况或某些特殊情况下，由各发电机进行分区供电，从而可以把故障限制在一个区域的小范围内。不仅不同电站可以分区供电，当汇流排采用分段结构时，同一电站的不同发电机组也可分区供电。在电网布置上，应尽量减少隔舱供电线（主干电缆）的根数和长度。为此可采用区域配电由负载中心供电的办法，即在船上划分若干个供电区，在每个区内设置负载中心，向该区域的用电设备供电。除了极端重要的设备由主配电板直接供电外，其他设备都由分布在各个区域的负载中心供电。安装时，主干电缆应敷设在不易受到损害的位置上。必要

时,还要在电缆外部配备适当的保护。

(2) 电网结构应能适应各种工况运行状态,并能灵活地进行运行工况的转换。不仅正常运行时能安全可靠地供电,而且在系统故障或电气设备检修及故障时,也能适应调度要求。使停电时间最短,影响范围最小,使电网结构能满足调度灵活、操作方便的基本要求,既能灵活投切某些机组或线路,又能满足系统在事故、检修及特殊运行方式下的调度要求,不致过多地影响负载的供电和影响系统的稳定运行。这一点对负载较多的大、中型船舶更为重要,网络重构技术正是为此目的而迅速发展。电网还应为改装、扩容留有一定的裕量。

(3) 电网结构设计在满足可靠性和灵活性前提下作到经济、合理。这包括建造成本和电网运行的经济性。在满足船舶功能和技术指标前提下、设计结构应简单、清晰,以节省开关电器数量;对容量较大的网路应适当采用限制短路电流的措施,以便选用廉价或轻型电器;二次控制与保护方式不应过于复杂,以利运行和节约设备和电缆投资。

设计中要照顾设备安装、电缆敷设对船舶性能和其他部门的影响。

设计应尽量减少线路损耗,降低故障率,减少操作管理人员。

1.4.2 结构形式

在发电站设备确定的条件下,电网型式的选择对保证供电的可靠性和生命力具有决定作用。船舶采用的电网型式很多,但其基本类型有以下五种。

(1) 干线式。它简称干线制,又称树干状供电制。这是一种以少量作为干线的纵向连线将配电板(盒)串接起来供电的方式,配电板(盒)可以分级串联或将它们的母线直接串联起来。其单线原理图如图 4.1-10 所示。

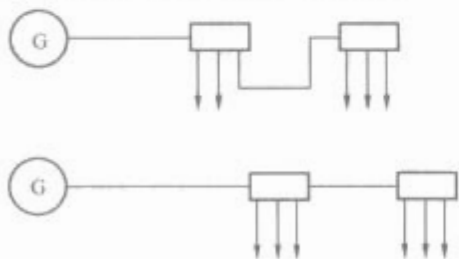


图 4.1-10 干线配电制供电方式

这种方式的主要优点是电网结构简单。可以大大减少电网干线的数量。这对于希望尽量减少穿过水密隔壁电缆数量的电力系统是合适的。其缺点有两点,一是供电生命力低;二是当干线输送的电功率大时,干线电缆的截面和质量比馈线制的大。故船舶规范对于串接配电板(盒)的数量有限制。

(2) 馈线式。它简称馈线,又称树枝状或辐射状态配电制。它是各用电负载用单独的馈线直接从主配电板取得电能的供电方式,其原理如图 4.1-11 所示。

这种供电方式的所有用电设备均由主配电板供电,控制配电很方便。发电机出现过负荷时,在主配电板上可以方便地切断部分不重要负载的供电。由于各馈线在主配电板都有



图 4.1-11 馈线配电制供电方式

自己的断路器和保护电器,所以任何一条馈线上出现短路故障时,相应馈线的保护装置即自动跳闸,不致相互影响。

船舶上用电负载很多时,馈线数量也很多,故这种方式只能用于用电设备少的小型船舶。主配电板向其所在舱室的负载供电也可能局部采用这种方式。

(3) 干、馈混合式。从形式上看,它是干线制和馈线制的混合供配电方式。电网配有一定数量的主干纵向连线向部分区段配电板(负载中心)或分配电板(盒)供电。然后,由这些配电板向负载供电。其结构如图 4.1-12 所示。

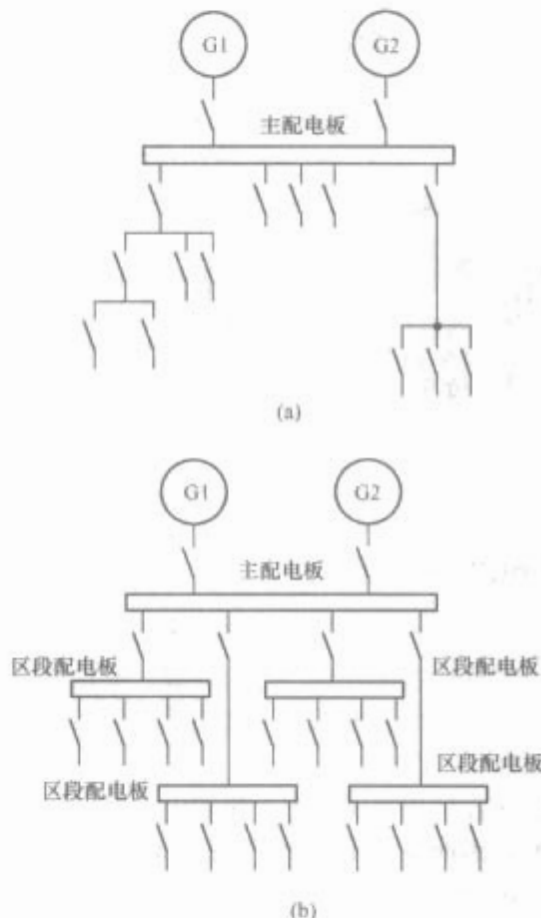


图 4.1-12 干馈混合(区段)供电方式
(a) 树枝树干混合型; (b) 区段配电制

(4) 环形供电式。这种配电制综合利用纵向和横向连接线构成闭环电网,向用电设备供电。其原理如图 4.1-13 所示。

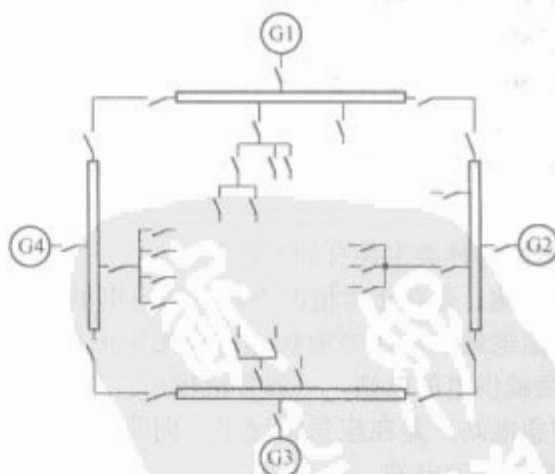


图 4.1-13 环形供电方式

环形供电方式的优点是可以构成较多的电源到负载的通路,所以有较高的供电可靠性。但这种供电方式在管理和保护设计上比较复杂,故要求较高的技术水平。根据连接线形成的电网闭环的情况,环形制还可分为全闭环、电源环和负载环数种。图 4.1-14 表示的是一个全闭环,它将电源主配电板和负载的配电板(盒)串接在一起,形成了一个完整的环。电源环和负载环则是分别在电源或负载部分用横向连线成局部环。

在两个电站的主配电板之间加上两根跨接线，就可以形成一个电源环，这种形式用得很多。

(5) 网形供电式。这种电网至少形成了两个以上组合的全闭环。它和环形供电制并没有本质上的区别，是由环形供电制发展而成的一种形式。这种电网只出现在某些吨位很大的船舶上。

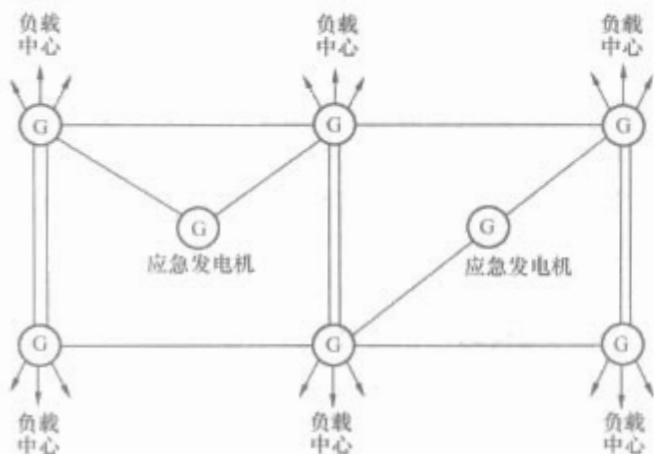


图 4.1-14 网形供电方式

目前，我国建造的船舶电力系统，基本上采用干馈混合供电网络。随着船舶电力技术的发展，环形、网形供电制将成为很有前途的配电方式，会应用于今后我国建造的船舶上。

2 船舶电力网络的计算

2.1 电力网络的等效电路

为保证船舶电力系统运行的安全、可靠、优质而又经济，必须进行一系列的电气计算，而电力系统的等效电路是电气计算的基础。船舶电力系统中的主要电气元件有发电机、电缆、变压器和负荷等，正常运行时三相对称且参数相等，可以只用其中一相作出其等效电路。

2.1.1 发电机

发电机是供电电源，其等效电路如图 4.1-15 所示。在电力系统计算中，一般不计发电机的电阻，因此其参数只有一个电抗 X_G 。

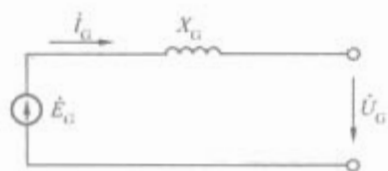


图 4.1-15 发电机等效电路

2.1.2 电缆

船舶电力系统中的电缆较短且电压较低，因此属于短线路，其等效电路参数只有一个串联总阻抗 $Z=R+jX$ ，而不计并联导纳的影响，如图 4.1-16 所示。

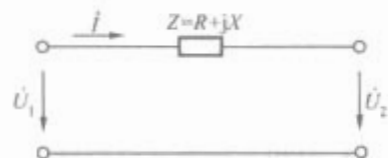


图 4.1-16 电缆等效电路

2.1.3 变压器

船用变压器主要是双绕组变压器和三绕组变压器。双绕组变压器的 T 型等效电路如图 4.1-17 所示。由于励磁支路阻抗 $Z_m=R_m+jX_m$ 相对较大，励磁电流很小，在 $Z_1=R_1+jX_1$ 上引起的电压降也不大，所以可将励磁支路前移组成 Γ 型等效电路。

三绕组变压器的等效电路如图 4.1-18 所示，较双绕组

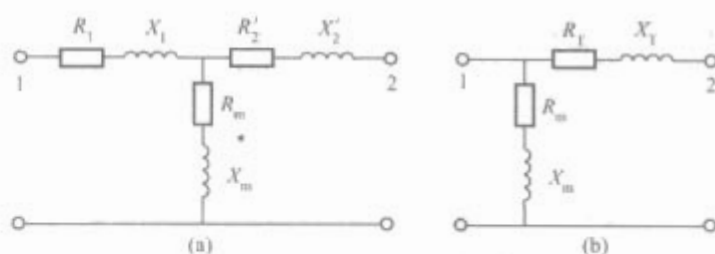


图 4.1-17 双绕组变压器等效电路
(a) T 型等效电路；(b) Γ 型等效电路

变压器多了一个阻抗支路， Z_{T1} 、 Z_{T2} 和 Z_{T3} 为折合到同一电压等级的三个绕组的等值阻抗，励磁支路以导纳 Y_T 表示。

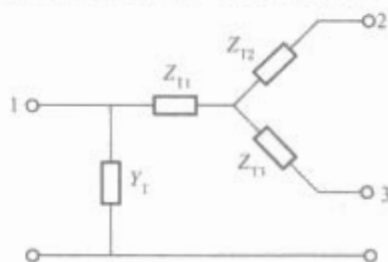


图 4.1-18 三绕组变压器等效电路

2.1.4 负荷

根据工程上对计算要求的精度不同，负荷的表示方法也不同，一般有如下几种表示方法：

- (1) 把负荷表示成恒定功率 $P_L=c$ 、 $Q_L=c$ 。
- (2) 把负荷表示成恒定阻抗 $Z_L=c$ 。
- (3) 用感应电动机的机械特性表示负荷。
- (4) 用负荷的静态特性方程表示负荷。

通常最常用的是前两种，其等效电路如图 4.1-19 所示。

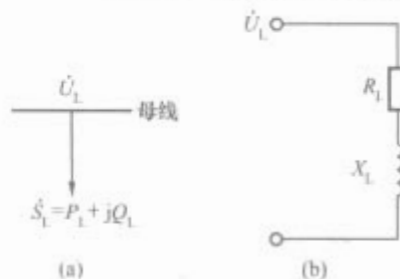


图 4.1-19 负荷的等效电路
(a) 用恒定功率表示；(b) 用恒定阻抗表示

2.1.5 船舶电力系统

船舶电力系统的等值网络由单个元件的等值电路连接在一起得到。由于电力系统中可能存在变压器，从而出现不同的电压等级，因此，不能仅仅将这些简单元件的等值电路按元件原有参数简单的相连，而要进行适当的参数归算。在船舶电力系统中，一般归算至系统主电网电压等级。电力系统的等值电路是进行电力系统各种电气计算的基础，在电力系统的等值电路中，其元件参数可以用有名值表示，也可以用标么值表示，这取决于计算的需要。

2.2 电压降和功率损耗的计算

2.2.1 直流电力网络

对于船舶直流电力网络，如以 R 表示单线的电阻，则当负荷电流为 I 时，线路电压降为

$$\Delta U = 2IR \quad (4.1-1)$$

将此电压降除以线路末端的电压 U ，并以百分比表示，可得相对电压降

$$\epsilon\% = \frac{\Delta U}{U} \times 100 = \frac{2IR \times 100}{U} \quad (4.1-2)$$

将所有电力负荷按工作概率分类,工作概率相近的负荷划归一类,而把一类中的所有负荷都近似看作具有相同的工作概率和功率。这样就把求取功率值和工作概率都不相同的许多系统的合成功率问题,简化为求取若干类等功率和等工作概率的系统同时工作的合成功率问题,可以逐类按二项分布的随机模型进行处理。

各类负荷所取的功率值为该类负荷的平均功率

$$P_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i \quad (4.1-19)$$

式中: P_B 、 P_i 和 m 分别为该类负荷的平均功率、各项负荷的功率和负荷数量。

依据二项分布的随机模型,一类均取相同工作概率 p 和相同功率 P_B 的负荷合成功率

$$P_N = mP_B p = \sum_{i=1}^m P_i p \quad (4.1-20)$$

如果全船电力负荷按工作概率划分为 S 类,则全船电力负荷的总功率为

$$P_{\Sigma} = \sum_{j=1}^S P_{Hj} = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^m P_{ij} p_j = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^S P_{ij} p_j$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1S} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2S} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_S \end{bmatrix} \quad (4.1-21)$$

式中: P_{Σ} 、 P_{Hj} 和 p_j 分别为全船电力负荷总功率、第 j 类负荷的合成功率、第 j 类负荷的平均工作概率。

分类模型实质上是按类统一规定设备的工作概率,只要将各类负荷乘上其所属类别的工作概率,然后相加就可以得出全船电力负荷的总功率。但是,在同一类的负荷之间功率相差较悬殊的情况下可能带来较大误差。为此,在分类负荷合成时通常不直接采用工作概率进行计算,而采用“不同时工作系数 K_d ”,以便考虑因工作概率较低而可能产生的估算误差因素。有的计算方法在将各类别的负荷相加成全船电力负荷时,还对各类负荷乘上一个“类别不同时工作系数”,以修正类别负荷之间的差异。

2.3.2.3 回归模型

船舶电力负荷虽然是一个随机变量,但它与船舶类别、推进功率和排水量等要素有一定内在关系。前苏联巴诺夫和德国薛莱勃尔等人统计了大量相同类型船舶排水量、推进功率和电力负荷的功率数据,用统计学中的回归方法加以处理,获得了按排水量或推进功率来估算船舶电力负荷值的经验公式,称这种估算方法采用的模型为回归模型。

建立回归模型的要点是收集大量同类型船舶的参数,整理出各条船的电力负荷 P_i 和排水量 D_i 及推进功率 N_i 等要素之间的对应关系,绘在同一直角坐标图中,即可看出这些参数相互间的内在联系。然后用电力负荷 P 和排水量 D 、推进功率 N 的某种线性或非线形函数关系 $P=f(N, D)$ 作为经验公式,它与坐标上各个数据点的垂直距离应满足最小二乘原则,即

$$\sum_{i=1}^n [P_i - f(N, D)]^2 = \min \quad (4.1-22)$$

巴诺夫采用的统计方法是一次线性回归,比较简单,但其精度有一定限制。这种方法将船舶运行分成航行和停泊两种基本状态,航行状态下的电力负荷主要由推进功率决定,停泊状态下主要与排水量有关,然后进行统计,并用线性回

归法求取经验公式。薛莱勃尔采用的统计方法是多元回归,用抛物线公式求取近似经验公式,复杂程度和准确性都有较大提高。

必须指出,回归模型的应用有一定局限,不可能对各种工况下的负荷情况作出明确的描述。此外,对某种类型船舶进行统计所得到的经验公式也只适用于该种特定类型的船舶,不宜跨类型加以推广。民船的统计结果不适用于军舰,螺旋桨转速低的船的统计结果也不适用于高转速的船,否则误差较大。再加上技术的发展,船舶装备的增加和更新,统计的结果也必须进行不断的修正。所有这些因素都将限制其应用范围和计算精度,但是应用这种模型可以对各种类型船舶和各种工况的负荷进行广泛的统计,积累有价值的资料,对于预估船舶电力负荷的大致范围或检验电力负荷计算的可靠程度仍有一定的实际价值。

2.3.3 按三类负荷法计算电力负荷

三类负荷法是目前船舶设计中广泛应用的一种计算方法,它采用表格形式进行统计计算,简单明了,适合于实际工程应用。

2.3.3.1 工况选择

为使电站合理地适应各种工况的要求,电力负荷的计算通常分工况进行。工况的选择应根据船舶类型和使命等实际情况确定,所确定的工况应具有典型性,在这些工况下各用电设备的工作概率应相对稳定。一般选择其中部分工况进行负荷计算,其中必须把最大、最小以及经常性的用电工况包括进去。当船舶技术指标书或订货合同对负荷计算的工况划分未作明确规定时,可按锚泊、靠岸、巡航、功能和应急工况的模式进行划分。近年来,大部分船舶都配备了空调设备,夏冬季用于空调的电功率也相当可观,进行负荷计算时也要加以考虑。

2.3.3.2 负荷分类

采用三类负荷法计算电力负荷,首先必须收集和了解船舶用电设备的电气参数和使用情况,包括名称、用途、数量、性质、额定参数以及在各种工况下的运行工作情况等。计算某一工况的电力负荷值时,要将该工况下的用电负荷按其使用情况分成三类。

(1) 第Ⅰ类负荷。在该工况下长时间连续使用的负荷。

(2) 第Ⅱ类负荷。在该工况下短时或重复短时使用的负荷。

(3) 第Ⅲ类负荷。指偶然短时使用的负荷以及按操作规程可以在电站高峰负荷时间以外使用的负荷。

2.3.3.3 计算步骤

三类负荷法计算电力负荷的主要步骤如下:

(1) 按表格列出所有用电设备的名称、台数、最大机械轴功率、电动机主要参数。

(2) 选取计算工况,并确定各种工况下投入运行的设备种类及台数。

(3) 按工况分别计算每台设备的功率值。

(4) 将各工况下各类用电设备的实际消耗功率分别累加,算出第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类负荷的总功率。第Ⅰ类负荷总功率乘以第Ⅰ类负荷的同时系数 K_{dI} (0.7~0.9),第Ⅱ类负荷总功率乘以第Ⅱ类负荷的同时系数 K_{dII} (0.4~0.6),然后相加得到第Ⅰ、Ⅱ类负荷功率总和 $\Sigma P'$ 和 $\Sigma Q'$ 。

(5) 考虑5%的网络损耗,将第Ⅰ、Ⅱ类负荷功率总和 $\Sigma P'$ 和 $\Sigma Q'$ 各乘系数1.05,作为全船相应工况下的电力负荷功率 ΣP 和 ΣQ ,第Ⅲ类负荷在全船电力负荷中不计,在发电机功率确定之后,其数值可用于检查发电机是否会超过短

时过载的允许范围。对第Ⅲ类负荷中功率较大的设备应考虑其启动对发电机组的影响,必要时应适当加大发电机容量。

(6) 由上述计算结果,求得相应工况下电力负荷总的功率因数

$$\cos\varphi_H = \frac{\sum P}{\sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q)^2}} \quad (4.1-23)$$

三类负荷法的计算精度取决于各种系数选择的合理程度,是一种在很大程度上依赖于经验的计算方法。因此,在有合适的母型船作参考时,计算结果比较精确。

2.3.4 电力负荷的计算机仿真法

运用计算机仿真法计算电力负荷就是根据各用电设备工作概率利用计算机对船舶电力系统总负荷的构成行为进行随机模仿,从中得到统计功率,其计算精度比其他方法更高。

利用计算机模拟计算负荷,需要明确船舶电力负荷的数量、功率及各项负荷的工作概率,故此方法适用于电力系统的初步设计和技术设计阶段。计算时也要进行工况划分,分别求出各典型工况下的负荷值。

(1) 首先根据各用电负荷的属性将设计船舶的负荷进行分类统计,一般分为动力装置用辅机、甲板机械、舱室辅机、武器装备、冷藏通风机械、双通导航设备、照明及生活用电、消磁机修及其他等八类。

(2) 然后计算各典型工况下各负荷所需的有功功率和无功功率,一般分四种情况处理:

1) 对于输出功率基本恒定的电动机类负荷,其所需的有功功率为

$$P = \frac{K_L K_{fg} P_e}{\eta} \quad (4.1-24)$$

式中: K_L 、 K_{fg} 、 P_e 、 η 分别为电动机的利用系数、在指定工况下的机械负荷系数、电动机的额定功率和电动机在实际负荷状态下的效率。

所需的无功功率为

$$Q = P \tan(\arccos\varphi) \quad (4.1-25)$$

式中: $\cos\varphi$ 为电动机在实际负荷状态下的功率因数。

2) 对于输出功率变化的电动机负荷,其所需的有功功率可从其典型有功负荷曲线通过计算一个典型工作周期内的功率均方根值得到,而典型有功负荷曲线可通过对相同或类似设备在船舶上实际用电情况的测试记录或对其典型工作程序的分析得出。所需的无功功率可从典型无功负荷曲线通过计算均方根得到,计算方法与所需有功功率的相同。典型无功负荷曲线可通过相同或类似设备在船舶上实际用电情况的测试记录或对其典型工作程序的分析得出,也可从典型有功负荷曲线换算得到。若典型的有功、无功曲线或机械负荷曲线是一条光滑的曲线,则可近似地用一系列矩形和梯形等效。

3) 对于同属于一个系统且相互之间存在固定的协同、制约或依赖关系的多个用电设备,应根据系统实际工作情况或程序综合成一项系统负荷来考虑,其典型负荷曲线应是若干用电设备组合而成的系统负荷曲线,一般以用电功率的形式表示。若系统负荷由若干台电动机组成,并欲从该系统负荷的典型有功负荷曲线换算出典型无功负荷曲线,则应注意在换算过程中对系统中的各台电动机进行分别处理。

4) 对于照明和电热类负荷,可直接用其标明的额定功率作为所需的有功功率,而所需的无功功率取为0。

(3) 其次确定各用电负荷的工作概率,一般可将负荷的工作概率从0~1均匀地分为10挡(每隔0.1一挡),具体某一负荷的工作概率可按“四舍五入”的原则划归某一档次。

(4) 借助于计算机对电站负荷进行仿真计算,根据计算

结果绘制出电站负荷(包括有功负荷和无功负荷)的相对频数分布曲线和保证供电概率曲线,并计算出平均功率及平均功率因数。

3 船舶配电系统

3.1 船舶配电系统的组成、功能及一般要求

3.1.1 船舶配电系统的组成

由船舶配电装置及相应的供电网路组成。按其用途可分为主配电系统、应急配电系统和事故配电系统。

3.1.2 船舶配电系统的功能

配电系统的主要功能如下:

(1) 正常情况下接通和开断电源至用电设备间的供电网路,指示开关的通断位置。

(2) 测量和监视电力系统的电气参数(如电压、电流、频率、功率、功率因数等)。

(3) 控制、调整电力系统的各电气参数。

(4) 当电力系统发生故障或不正常运行时,保护装置将自动地切除故障电路或发出声光报警信号。

(5) 完成自动化或遥控设备的相关功能。

3.1.3 船舶配电系统的线制

(1) 采用下列线制的配电系统。

1) 直流配电系统。

a. 单线系统。

b. 双线绝缘系统。

c. 负极接地的双线系统。

2) 交流配电系统。

a. 单相单线系统。

b. 单相双线系统。

c. 单相双线绝缘系统。

d. 三相三线绝缘系统。

e. 三相四线系统。

f. 三相三线系统。

(2) 接地的配电系统。

1) 系统的接地应用不带电部件的接地装置。

2) 对于中性点接地的交流三相四线系统,应有切断每台发电机的中性线的措施,以便在维修或测量绝缘电阻时可予以断开。并应有保证重新可靠接地的措施。

3) 在发电机中性点接地系统上,变压器中点不应接地。

(3) 绝缘的配电系统。用于电力、电热和照明的绝缘配电系统,不论是一次系统还是二次系统(电压不超过50V者除外)均应设有能连续监测对地绝缘状态的装置;在通常情况下,该装置应能发出声光报警信号。

(4) 负载的平衡。对于三线或四线交流系统,应在最后分路上将用电设备很好地加以组合,以使在正常情况下,系统各相负载在分配电板、区配电板以及主配电板处尽可能使负载不平衡度控制在各自额定负载的15%以内。

3.1.4 船舶配电系统的经济性、可靠性、维修性

3.1.4.1 经济性

应合理确定配电系统的自动化程度,减少操作管理的工作量。配电系统的自动化程度应与电站的自动化程度相适应。

配电系统的预期工作寿命应与船舶的设计使用寿命相一致。船舶配电系统的预期工作寿命应不少于20年。

3.1.4.2 可靠性

在进行配电系统设计时,应选用可靠性较高的供电结构

形式,以便于实现在功能工况下的分区供电。断路器避免采用主回路电源作其控制电源,以确保主回路失电时对断路器的控制。应尽量向用电设备(尤其是重要用电设备)提供灵活多样的供电操作方案,以提高系统在各种意外及故障情况下的供电可靠性。

配电系统及其设备的设计应充分考虑在船舶发生火灾或破损进水等情况时,能方便、有效地实施损害管制,迅速切除或隔离受损区域,及时抢修受损设备。

3.1.4.3 维修性

(1) 在电气集控台上应能对主配电板负载屏馈线及馈线断路器的工作状态进行有效监视,以便及时发现故障状态和故障区域。

(2) 配电设备结构形式应便于触及和维修,配电装置和配电电器应易于更换。

(3) 在系统的适当部位应设有隔离开关或装置,以确保维修作业的安全性。

3.1.5 重要用电设备的供电

重要用电设备系指对船舶操纵和安全所必需的设备;保证船员和旅客安全的设备以及功能和特殊作业而设置的用电设备。

重要用电设备按其重要程度依次排列。设计中应采取相应措施,以保证在船舶受到损害时可优先得到供电。这些设施如下。

- (1) 应急通信。
- (2) 应急照明。
- (3) 消防泵及损管用电设备。
- (4) 操舵装置用电设备。
- (5) 对海搜索雷达。
- (6) 重要的推进保障系统,即对船舶推进装置进行冷启动及机械保护所必需的设备,至少应包括如下设备。
 - 1) 柴油机推进装置有,包括电动燃油泵,电动滑油泵,海水冷却泵,电动鼓风机。
 - 2) 蒸汽轮机推进装置有,包括电动点火泵,强制通风鼓风机,电动滑油泵,电动给水泵,电动控制的锅炉截止阀。
 - 3) 燃汽轮机推进装置有:包括电动燃油泵,电动滑油泵,起动液压泵,冷却水泵,控制模块。
- (7) 具有 ZCR 冷藏装置级船舶中的冷藏机械(例如压缩机、循环泵和通风机)。
- (8) 机舱通风机。
- (9) 应急发电机原动机的辅助保障系统,如海水增压泵,燃油输送泵,机舱通风机,起动空气泵。
- (10) 船内通信及船舶操作操纵仪器。
- (11) 航行灯和信号灯。
- (12) 电子设备(如雷达、无线电通信、导航仪器等)及所在舱室的通风和空调系统。
- (13) 探测、报警设备,自动喷水系统和压力水雾灭火系统。
- (14) 医疗急救设备。

3.1.6 对配电设备的一般要求

3.1.6.1 外壳

配电设备的外壳及框架应有足够的机械强度,在配电设备的电缆入口处均应采取防护措施,以防水滴沿着电缆进入配电设备的内部。

3.1.6.2 断路器的选用

- (1) 配电设备中选用的框架式断路器、塑壳式断路器应

符合相关规范要求。

(2) 对用动力操作的断路器,还应设有人力操作机构,以便在动力操作机构发生故障时应急使用。人力操作机构应在板前操作。

(3) 带熔断器的断路器,在结构上应能保证在个别熔断器发生熔断时,不会导致单相运行,并应易于更换而不会有意外触及带电部分的危险。

(4) 配电板(箱)内所安装的配电用(或负载用)备用断路器的数量,一般应为各板(箱)上实际馈线电路所用的全部断路器数量的 10%。

3.1.6.3 安全防护

配电设备应通过一种或几种方法来达到防止人体触及带电部分。

(1) 用滞燃、耐潮的绝缘材料遮盖带电部分,且所用绝缘材料应具有相应的耐温等级和一定的机械强度。

(2) 在设备或通道的门上装设只有使用专用工具或钥匙才能开启的锁或锁扣机构。

(3) 利用配电设备自身结构来实现,也可对使用者作出规定,如规定维修通道只允许经过批准的人员可以通过。

(4) 如果配电设备中有断电 5s 后仍带有大于 120V 静电电压的设备(如电容器),则应设有警告牌。

3.1.6.4 防潮、通风和照明

(1) 安装在温度变化较大处所的配电设备应采取适当的防护措施(如通风或内部加热等),以防止设备内部产生有害的凝露。

(2) 安装在高温舱室的配电设备在额定工况下达到温升稳定时,设备内外的空气温差应不超过 15℃。

(3) 发电机组控制屏的照明电源应从发电机断路器的电源侧经独立熔断器直接引出。主配电板后的照明电源可从汇流排经独立熔断器引出,开关应设在通道入口处。

3.2 船舶主配电系统

3.2.1 组成

主配电系统包括一次配电系统和二次配电系统,它主要由主配电板、负载中心或区配电板、分配电板(箱)、岸电装置以及输电电缆等组成。

从主配电板至负载中心(或区配电板)或分配电板(箱)的馈线及主配电板直接供电的负载馈线系统称之为一次配电系统;由负载中心(区配电板)或分配电板(箱)至电能负载供电网路组成馈电系统称为二次配电系统。

3.2.2 主配电系统的电能传输

此部分内容包括主配电板的配电馈线、配电系统的馈电方式、用电设备的供电等。

3.2.2.1 主配电板的配电馈线

(1) 要求有两路电源供电的用电设备应以系统或区域为原则,从不同主配电板或不同主配电板分段取得正常电源和备用电源。

船舶设有两个及两个以上的主电站时,按下列规定向重要用电设备提供正常电源和备用电源:

1) 正常电源。对于本节 3.1.5 条中的最重要用电设备一般应由一块主配电板提供,其他重要用电设备由一块主配电板或负载中心或区配电板提供。

2) 备用电源。由另一块主配电板或负载中心或区配电板提供。

仅有一个主电站,但设有两台主发电机组且具有主汇流排分段隔离装置将主配电板分为两个独立的分段的船舶,每

台发电机组可视为独立电源,为重要用电设备提供两路电源,靠近用电设备的分段提供正常电源,远离用电设备的分段提供备用电源。

(2) 在设计船舶主配电系统时,尽可能在各主配电板及主配电板分段之间等分负载。

(3) 仅要求单一电源供电的用电设备,应接至最靠近该负载的主配电板、负载中心或分配电板(箱)。

3.2.2.2 配电系统的馈电方式

主配电板至负载中心配电板、主配电板至分配电板(箱)或负载中心配电板至分配电板(箱)的配电系统应采用一一对应的配电方式,即一路电缆仅连接一个负载中心配电板或分配电板(箱)。

3.2.2.3 用电设备的供电

主配电系统按用电设备用途分系统进行供电。

(1) 船舶上额定功率较小的小型用电设备(如食品搅拌机、咖啡壶、台扇、壁扇、舱顶扇、电冰箱、雨刮器和衣橱加热器等),可由照明分配电板(箱)供电。

(2) 额定功率大于或等于1kW的电动机和所有重要用途电动机,均应从配电板(箱)设独立的最后分路供电。

(3) 在三相交流系统中,对最后分路上的单相用电设备进行合理组合,以使在正常情况下各分配电板(箱)、负载中心和主配电板上的各相负载尽可能平衡。应将负载不平衡度控制在各配电板(箱)额定负载的15%以内。

(4) 对敷设在潮湿处所(如厨房、洗衣间、冷库和底舱易积水部位等)的局部主配电系统,应采取隔离或其他有效的措施,以保证主配电系统的整体绝缘水平。

3.2.3 区域配电与负载中心

在用负载较多的大中型船舶上,将电站的部分配电屏通过汇流排馈线电缆延伸至某一区段或负载密集区域,并向该区段或区域内的分配电板(箱)或单个负载供电的配电中心。称之为负载中心(或称为区配电板)。

负载中心应设置在负载密集区内,便于向各负载组或单个负载供电的部位。负载中心至少应配置下列电器:①具有所需电流额定值和保护功能的断路器;②绝缘监测装置;③进线隔离开关隔离装置;④根据容量设置相应的电压表、电流表及仪用电流互感器和电压互感器。

根据下列原则集中在一起的负载由一个负载中心供电。

(1) 同一类型的负载,或负载相类似的及动作有联系的负载集中在一起。

(2) 同一舱室或附近舱室的负载集中在一起。

(3) 通风机等使用上有必要集中在同一配电板的负载集中。

负载中心是在船舶按区段配电或按“大块”功能负载分区的情况下而设置的。此时负载中心向位置相近的负载组和大型辅助设备供电,以减少主配电板的馈线数量,并获得馈线电缆的经济负载。

除了少数最重要的负载外,全船大部分设备均由负载中心供电,减少了各种设备故障时对主配电板的干扰,从而保证了主配电板工作的可靠性和供电品质,对于重要设备还可以由不同舷侧的负载中心提供双重供电。

3.2.4 分配电板(箱)

设置分配电板(箱),是为相互靠近的成组负载或执行同一功能的多个负载供电。分配电板(箱)设置在便于向成组负载或功能组负载供电的部位。每个分配电板(箱)的最多供电分路数应不超过14路,其中包括一定数量的备用分路。

分配电板(箱)可以由负载中心供电,也可由主配电板直接供电。

3.2.5 接岸电

此处配有岸电箱,其内部装设相应装置,岸电与船电连接应按要求正确操作。

3.2.5.1 岸电箱

岸电箱中应设有下列装置:

(1) 用于连接软电缆的合适的接线柱(其中包括用于将船体与岸地相连接的接线柱)。

(2) 符合规定的岸电保护装置。

(3) 相序测定或相序自动对接装置。

(4) 显示岸电状况的指示灯或电压表。

(5) 标明船舶电力系统额定电压和额定频率的铭牌。

在确定岸电箱的设置位置时应充分考虑引入岸电(或其他外来电能)的方便性。一般应将岸电箱设置在船舶主甲板以上的中心线附近,如有困难,则可在船舶的两舷并列设置。岸电箱设置应考虑使输送岸电(或其他外来电能)的软电缆在接至岸电箱之前无需穿过一个以上的舱壁或其他构件,并应采取措施使这些电缆不会妨碍人员的通行和不会受到意外损伤。

3.2.5.2 岸电与船电连接

(1) 岸电馈线与主电站或停泊发电机组的连接应满足下列要求:

1) 装有停泊发电机组的船舶,岸电馈线电缆应接在主配电板相应分段的汇流排上。

2) 未装停泊发电机组的船舶,当主汇流排跨接电缆断路器的额定电流小于岸电馈线装置的额定电流时,岸电馈线电缆应并接在离岸电箱最近的主配电板汇流排上。

当主汇流排跨接电缆断路器的额定电流大于岸电装置的额定电流时,岸电馈线电缆应接在主汇流排跨接电缆上,而设有两个及两个以上岸电箱时,各岸电箱馈线电缆应尽可能并接在两个主电站的主汇流排跨接电路上。

(2) 当岸电或(和)船电系统为中性点接地的交流三相系统时,则须设有将船体与岸地相连接的设施。当船电系统为以船体作回路的直流系统时,须将岸电的负极接于船体。

3.2.6 重要负载两舷供电转换装置

船舶主配电系统应设置重要负载两舷供电转换装置,以确保两路电源的有效转换。为了避免动力负载在转换过程中可能产生的瞬态过电流,应要求设有延时,转换过程的典型断电时间应为0.5~20s。按动作方式,两舷供电转换装置可分为自动转换和手动转换型两种。按动作时间,自动转换装置又可分为瞬时型和延时型两种。供动力负载用的两舷供电的自动转换装置应为延时型。供照明负载用的可为延时型,也可为瞬时型。

重要负载的两路电源转换装置应设置在负载入口端的附近或向负载供电的分配电板(箱)的入口端,当区配电板(或分配电板)专用于彼此靠近的单一功能组负载时,可将两路电源转换装置设置在区配电板(或分配电板)的入口端。

3.3 船舶应急配电系统

3.3.1 组成

应急配电系统由应急配电板、应急分配电板及输电电缆等组成。

3.3.2 应急配电系统的电能传输

应急配电系统将一块或多块应急配电板上的电能传输到

应急分配电板（箱）和应急负载，每块应急配电板应能从船舶的几个电源得到电力，这些电源是：

- (1) 在正常工况下，应急配电板由来自船舶主电站的正常电源或备用电源供电。
- (2) 在应急工况下，应急配电板由应急发电机供电。应急配电板在下列情况下发生供电电源转换：
 - 1) 当正常电源失电时改由备用电源供电。
 - 2) 当正常电源和备用电源均失电时，改由应急发电机组供电。
 - 3) 在由应急发电机组供电的情况下，当备用电源恢复正常时，改由备用电源供电。
 - 4) 在由应急发电机组供电的情况下，当正常电源或正常电源与备用电源均恢复时，改由正常电源供电。

3.3.3 应急配电系统的布置

船舶应急配电系统应尽可能远离主配电系统，一般应按如下方式布置：

- (1) 在水平方向上，应急配电系统应尽量靠近船舶中线面布置。
- (2) 在垂直方向上，应急配电系统应尽量在流水线以上布置。

3.3.4 使用蓄电池组的应急电力系统

所有船舶，不论其主电站和应急电站如何配置，均应设置由蓄电池组供电的应急电源。其供电范围一般应为：应急照明、航行灯、信号灯（探照灯除外）和通信、信号、报警装置以及其他要求应急蓄电池电源供电的重要监控装置。

当船舶主电源失电时，应急用蓄电池组应能立即投入应急网络，且给出报警信号；当主电源恢复时，蓄电池组应自动脱离应急网络。

应急网络蓄电池组工作时，应在有关控制部位设立信号，告示蓄电池应急系统正在工作。

应急用蓄电池组应按电源靠近用户的原则尽量分散布置于几个蓄电池室，采用分区供电方式。每个蓄电池供电分区的蓄电池室及充电、通风等附属设备、直流电力配电设备和各直流应急用电设备尽量处于同一舱段。

3.4 船舶事故配电系统

3.4.1 组成、功用

事故配电系统由固定敷设的电源侧事故电缆、负载侧事故电缆和贯通舱壁与甲板的短电缆、应急接插盒、事故电力受电插座、专用插头以及可供临时拉敷的轻便软电缆等组成。

由穿过舱壁和甲板的接线装置和轻便电缆组成的系统，布置在全船关键部位，用于跨接船舶主配电系统和应急配电系统的损坏分段上，以便重新给重要的用电设备供电。

3.4.2 事故配电系统的电能传输

事故配电系统的源头应视船舶的大小及该系统的供电能力选接至主发电机的接线盒处（若有困难，可接至主配电板上发电机断路器的电源侧），或接至应急发电机断路器的电源侧。当发电机的单机容量为 500kW 及以下时，应在左右两舷各设一根电缆立管；当发电机的单机容量大于 500kW，应在左右两舷各设两根电缆立管。

对设有应急电站的船舶在无应急配电板或应急分配电板的水密分舱内，事故配电系统的源头还可通过应急接插盒和轻便软电缆接至相邻水密分舱的应急配电板或应急分配电板（箱）上。

事故配电系统供电范围。

(1) 一般应为下列设备提供事故电力受电插座。

- 1) 舵机控制箱。
- 2) 消防泵控制箱。
- 3) 排水泵控制箱。
- 4) 内部通信分配电板（箱）。
- 5) 重要电子设备的分配电板（箱）。
- 6) 重要功能系统的分配电板（箱）。
- 7) 机舱中重要辅助设备的分配电板（箱）。
- 8) 重要的负载中心配电板。
- 9) 重要的照明变压器。

(2) 事故配电系统的供电范围可视船舶的大小以及主配电系统和应急配电系统的设置情况作合理调整，但无论如何至少应为下列设备提供事故电力。

- 1) 舵机控制箱。
- 2) 移动式电动损害管制设备，如移动式潜水泵、电焊机和电动切割机等。
- 3) 固定安装的损害管理设备，如消防泵和排水泵等。
- (3) 对重要的通信、监控和照明设备，当已设有备用蓄电池作为应急电源时，可以不再要求提供事故电力。

(4) 对与应急配电板或应急分配电板同舱设置的重要用电设备，当已提供应急电力时，可不再要求提供事故电力。

事故配电系统原则上应能直接将事故电力输送到各重要用电设备的电源输入端。当处于同一水密分舱的多个重要用电设备由一个分配电板（箱）供电时，事故电力可供电至该分配电板（箱）的入口处，但舵机、消防泵和排水泵除外。

3.4.3 布置

纵向排列的应急接插盒及临时拉敷的轻便软电缆应布置在主甲板以下，并应尽可能布置在纵向直通走道内。

事故配电系统的上下走线（包括电源引线和各受电设备所在舱室与事故电缆纵向主通道的连接线）应通过立管固定敷设。

应急接插盒、事故电力受电插座、需手动转换的事故电力控制盒、临时拉敷轻便软电缆的搁放架以及可向事故配电系统供应主电力的供电插座均应布置在易于接近的部位，各种接插盒、插座和控制盒的安装高度应为 1.3~1.8m。

3.5 交流中压配电板和控制设备特殊要求

船舶交流中压配电板和控制设备有一些特殊要求。

(1) 配电板和控制设备通常应为金属铠装式结构，其外防护等级应达到 IP22。但安装在配电板后上方无水、油及蒸汽管、油柜及其他液体容器的控制室中的配电板和控制设备，其外壳防护等级应至少为 IP21。

(2) 配电板应至少分为两个独立的分段，以便在其中某分段发生故障时，重要设备仍能正常运转。

(3) 较低电压电路的电器应与较高电压电路的电器分隔开来，并应布置成使操作人员不会意外地触及较高电压电路的带电部分。

(4) 主汇流排的电气间隙不应小于表 4.1-1 的规定。

表 4.1-1 主汇流排的电气间隙

额定电压 (V)	相间的最小电气间隙 (mm)	带电部分与接地金属间的 最小电气间隙 (mm)
1000~1100	30	30
3000~3300	50	50
6000~6600	90	65
10 000~11 000	125	100

(5) 所有断路器均应为抽出式结构,或有与其等效的设施,若安排成汇流排带电情况下能安全地进行维修,则也是可以接受的。

(6) 抽出式断路器、开关,应有在“工作”或“隔离”两个位置均能进行机械锁定设施。

(7) 抽出式断路器、开关,应能在抽出位置上自动遮盖其带电的静触头,或设计成只有人工插入遮盖板之后,才能全部抽出断路器。

(8) 应设有足够数量的隔离开关、接地和短路设备,以保证维修工作的安全。

4 船舶电力母线与电缆的选择

4.1 船舶电力系统母线的设计

4.1.1 母线材料、类型与布置方式选择

电力系统母线又称汇流排,是大截面的载流体,通常固定在绝缘子上使用。

(1) 母线材料。船舶电力系统中的母线由于实际环境,如温度、湿度、盐雾、霉菌等条件比较恶劣,为保证其安全可靠,应采用硬质高纯度(99.5%以上)的铜型材,即硬铜母线 TMY。

(2) 母线类型。船舶电力系统母线一般采用敞露母线的型式,母线导体的截面形状主要有矩形、槽形和管形。截面形状影响母线导体的散热、集肤效应系数和机械强度。矩形截面母线周长较大,散热面大,散热条件好;在同一允许工作电流下,矩形母线的截面积较小,所耗金属材料相应也少;矩形平面便于螺栓连接,安装简单。因而船舶电力系统母线通常采用矩形截面型式。从集肤效应与机械强度的角度考虑,矩形母线截面的宽度一般不超过 10mm,宽度与高度之比约为 0.05~0.1 左右。

当单片的矩形截面母线载流量不能满足要求时,可采用多片的矩形截面母线,但由于此时散热条件变差,多片矩形截面母线的载流量不是随导体片数增加而成倍增加的,尤其是每相超过 3 片以上时,单位截面的有效载流量下降较多,所以每相矩形截面母线一般最多只用到 4 片。槽形导体和圆管形导体的载流能力大,集肤效应系数小,电流分布比较均匀,散热条件好,机械强度高,但造价较高,安装也不方便。

当承载的工作电流为 2kA 左右时,一般采用每相单片矩形母线;当承载的工作电流为 2~5kA 时,一般采用每相 2~4 片组成的多片矩形母线,片间留有宽度等于母线截面宽度的通风间隙;当承载的工作电流为 5~8kA 时,可采用双槽形母线导体;当承载的工作电流为 8kA 以上时,宜采用圆管母线导体。

(3) 母线布置方式。船舶电力系统矩形母线导体的布置方式常采用三相水平立放布置和三相水平平放布置,母线的布置方式影响散热和机械强度。母线导体水平立放布置,散热条件好,载流量大,但机械强度较差;母线导体水平平放布置,机械强度较高,但散热条件较差。

4.1.2 船舶电力系统矩形母线设计的原则

设计母线导体时,应该根据正常工作条件(包括额定电压、额定电流、频率、开断电流等)、短路条件(包括热稳定、动稳定和短路持续时间等)、环境条件(包括温度、湿度、海域高度介质状态等),综合考虑进行选择。

4.1.2.1 矩形母线截面尺寸的选择

矩形母线的截面尺寸可按以下四点进行选择:

(1) 按持续工作电流选择。为了保证母线的长期安全运行,母线长期允许的最大持续电流应大于或等于回路的最大持续工作电流。

(2) 按经济电流密度选择。为考虑母线长期运行的经济性,除配电装置的汇流母线以及断续运行或较短的母线外,一般可按经济电流密度选择导体的截面积。计算公式为

$$S_{Mj} = I_e / \delta_j \quad (4.1-26)$$

式中: S_{Mj} 为母线经济截面积, mm; I_e 为额定工作电流, A; δ_j 为经济电流密度, A/mm。

铜裸导体的经济电流密度可按表 4.1-2 选择。

表 4.1-2 铜裸导体的经济电流密度

经济电流密度值 δ_j (A/mm)	最大负荷利用小时数		
	3000 以下	3000~5000	5000 以上
	3.0	2.25	1.75

(3) 按发热条件选择。在最大允许连续负荷电流下,导体发热不超过导体所允许的温度,不会因过热而引起导体绝缘损坏或加速老化,也不会因此而影响导体的机械强度,使得导体整体强度下降,硬铜母线长期运行最高允许温度为 90℃。

(4) 按短路时的热稳定最小截面进行校验。在短路情况下,导体必须保证在短路时间内承受短路电流通过导体时产生的热效应,以保证供电安全。

4.1.2.2 矩形母线短路效应的校验

短路效应包括电磁效应和热效应,故母线设计要满足短路时的动稳定校验和热稳定校验,确保在短路持续时间里母线及整个电力系统的安全稳定。

4.1.3 母线导体的长期发(散)热与载流量计算

包括矩形母线的长期发热与散热计算、矩形母线载流量计算等,下面将详细叙述。

4.1.3.1 矩形母线的长期发热与散热计算

船舶电力系统中的敞露矩形母线一般都是自然冷却的。载流母线导体的发热量通过导热、对流和辐射传递到周围环境中。由于敞露母线沿长度方向的温度分布可以认为是均匀的,热计算可取单位长度母线导体为计算对象。

(1) 母线导体对流散热的计算。母线导体向周围空气的换热属于自然对流换热。自然对流换热分为大空间自然对流换热和有限空间自然对流换热。大空间自然对流换热是指换热面附近没有足以影响流体热边界层发展的物体情况下的自然对流换热。每一相母线导体的外侧为大空间自然对流换热;每一相母线导体片间属于有限空间自然对流换热。矩形母线导体自然对流散热的计算步骤如下。

1) 定性温度(℃)取母线表面与空气的平均温度,即

$$t_m = (t_M + t_0) / 2 \quad (4.1-27)$$

式中: t_M 为母线表面的温度; t_0 为母线周围的空气温度。

2) 定性尺寸(m)取母线截面的高度

$$L = h \quad (4.1-28)$$

3) 空气的容积膨胀系数(1/℃)为

$$\beta_m = 1 / (t_m + 273) \quad (4.1-29)$$

4) 根据定性温度 t_m 查表 4.1-3 求得物性参数 ν_m (空气运动黏度, m^2/s)、 Pr_m (普朗特准则数)、 λ_m [介质的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$]。

表 4.1-3 干空气的热物理性质 (p=101325Pa)

t (°C)	ρ (kg/m³)	c _p [kJ/ (kg·°C)]	λ×10 ² [W/ (m·°C)]	α×10 ⁶ (m²/s)	μ×10 ⁶ [kg/ (m·s)]	ν×10 ⁶ (m²/s)	P _r
-40	1.515	1.013	2.12	13.8	15.2	10.04	0.728
-30	1.453	1.013	2.20	14.9	15.7	10.80	0.723
-20	1.395	1.009	2.28	16.2	16.2	11.61	0.716
-10	1.342	1.009	2.36	17.4	16.7	12.43	0.712
0	1.293	1.005	2.44	18.8	17.2	13.28	0.707
10	1.247	1.005	2.51	20.0	17.6	14.16	0.705
20	1.205	1.005	2.59	21.4	18.1	15.06	0.703
30	1.165	1.005	2.67	22.9	18.6	16.00	0.701
40	1.128	1.005	2.76	24.3	19.1	16.96	0.699
50	1.093	1.005	2.83	25.7	19.6	17.95	0.698
60	1.060	1.005	2.90	27.2	20.1	18.97	0.696
70	1.029	1.009	2.96	28.6	20.6	20.02	0.694
80	1.000	1.009	3.05	30.2	21.1	21.09	0.692
90	0.972	1.009	3.13	31.9	21.5	22.10	0.690
100	0.946	1.009	3.21	33.6	21.9	23.13	0.688
120	0.898	1.009	3.34	36.8	22.8	25.45	0.686
140	0.854	1.013	3.49	40.3	23.7	27.80	0.684

5) 计算格拉晓夫准则数

$$Gr_m = g\beta_m(t_M - t_0)h^3/\nu_m^2 \tag{4.1-30}$$

式中：g 为重力加速度，取 g=9.81m/s²。

6) 计算努谢尔特准则数。铜排母线表面自然对流换热采用邱吉尔推荐的公式如下

$$Nu_m = \left\{ 0.60 + 0.387 \left[\frac{Gr_m Pr_m}{(1 + (0.559/Pr_m)^{9/16})^{16/9}} \right]^{1/6} \right\}^2 \tag{4.1-31}$$

7) 计算对流换热系数 α 为

$$\alpha = \frac{Nu_m \lambda_m}{h} \tag{4.1-32}$$

8) 母线导体每相每米对流换热量为

$$Q_{MD} = \alpha F_M (t_M - t_0) \tag{4.1-33}$$

式中：F_M 为每米导体的对流换热面积，m²/m。

对于单片矩形母线，母线导体每相每米对流换热量为

$$Q_{MD} = 2\alpha(b + h)(t_M - t_0) \tag{4.1-34}$$

对于多片矩形母线，总的对流换热量为内、外表面对流换热热量之和。外表面的对流换热系数 α_W=α，故外表面的对流换热量为 Q_W=α_WF_W (t_M-t₀)；内表面的对流换热系数 α_N=C₀α_W，故内表面的对流换热量为 Q_N=α_NF_N (t_M-t₀)，其中，F_W、F_N 分别为每米导体的外表面和内表面面积 (m²/m)；C₀ 为以外表面换热系数为基准的内表面相对换热系数，当导体间隙为垂直布置时，可取 C₀=0.1；当导体间隙为水平布置时，可取 C₀=0。故总的对流换热量为

$$Q_{MD} = Q_W + Q_N = (F_W + C_0 F_N) \alpha_W (t_M - t_0) \tag{4.1-35}$$

(2) 母线导体辐射散热的计算。母线表面的辐射散热量取决于母线表面的温度、表面辐射率和母线与周围物体的相对位置（即物体之间的角系数）。对温度不同的任意两物体之间的辐射换热量为

$$Q_{F12} = \epsilon_n \sigma F_1 (T_1^4 - T_2^4) \tag{4.1-36}$$

其中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$

$$\epsilon_n = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$$

式中：σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数；F₁ 为物体 1 的面积；ε_n 为系统黑度；F₂ 为物体 2 的面积；ε₁、ε₂ 分别为物体 1 和 2 的表面黑度；T₁ 和 T₂ 分别为物体 1 和 2 表面热力学温度。

由于周围环境的面积 F₂ 远大于母线的表面积 F₁，由式 (4.1-36) 可知，计算每片母线向环境的散热时，可取 ε_n=ε₁。

计算同相的两片母线间的辐射散热，由于两片母线的距离很近，且面积相等 F₁/F₂=1，辐射到周围环境的辐射热量可忽略，计算片间辐射换热时可只计算两片间的辐射热量，取 $\epsilon_n = \frac{1}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1}$ 。

对相间两片母线间的散热，除每片母线向周围环境散热外，还要同时考虑该片面向临相母线的辐射换热。利用三物体辐射换热模型，邻相间两片母线的辐射换热计算公式为

$$\frac{\sigma T_1^4 - J_1}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 F_1}} + \frac{J_2 - J_1}{F_1 \varphi_{12}} + \frac{\sigma T_0^4 - J_1}{F_1 (1 - \varphi_{12})} = 0 \tag{4.1-37}$$

$$\frac{\sigma T_2^4 - J_2}{\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 F_2}} + \frac{J_1 - J_2}{F_2 \varphi_{21}} + \frac{\sigma T_0^4 - J_2}{F_2 (1 - \varphi_{21})} = 0 \tag{4.1-38}$$

其中，J₁ 和 J₂ 分别为物体 1 和 2 表面的有效辐射，需通过辐射方程联立求解。有效辐射 J 是辐射换热计算中的重要概念，它等于表面的自身辐射 E 和反射辐射 ρG 之和。E=σT⁴，G 为外界的投射辐射，ρ 为表面反射率，对灰体 ρ=1-ε。φ₁₂ 和 φ₂₁ 分别为物体 1 对物体 2 和物体 2 对物体 1 的角系数。

φ 是一个纯粹的几何参数，它取决于两相母线导体表面形状大小和相互间的位置和距离。对于如图 4.1-21 所示的矩形母线布置形式，φ 的具体计算式如下。

对 A、B、C 三相片间的角系数 φ 为

$$\varphi = \sqrt{1 + \left(\frac{b}{h}\right)^2} - \frac{b}{h} \tag{4.1-39}$$

A、B 相间或 B、C 相间角系数 φ 为

$$\varphi = \sqrt{1 + \left(\frac{a - 3b}{h}\right)^2} - \frac{a - 3b}{h} \tag{4.1-40}$$

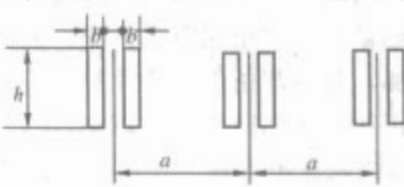


图 4.1-21 三相两片母线布置示意图

图 4.1-21 中，b 为母线矩形截面的宽度，h 为矩形截面的高度，a 为相邻两相间的中心相间距。

(3) 热缩母线导体散热的计算。对母线表面包覆有热缩管绝缘材料的铜排，绝缘材料表面的散热除辐射和对流散热外，还存在从铜排表面向绝缘材料外的导热。

对采用聚乙烯 (PE) 热缩管绝缘材料包覆的铜排，铜排损耗的热量需通过绝缘材料的导热传递到外表面，然后再通过自然对流和辐射传递到周围环境和空气中。由辐射和对流散热可计算出达到热平衡时热缩管绝缘材料外表面温度。热缩管内铜排外表面温度可由导热定律求解。通过铜排绝缘材料导出的热量为 I²r_w，由傅里叶导热定律得铜排绝缘材料内表面温度计算公式

$$t_{pn} = t_{pw} + \frac{I^2 r_w}{2(h+b)\lambda_p/\delta_p} \quad (4.1-41)$$

式中: t_{pn} 为铜排表面温度; t_{pw} 为热缩管绝缘材料外表面温度; λ_p 为热缩管绝缘材料的导热系数; δ_p 为热缩管绝缘材料的厚度; I 为流过该片的电流; r_w 为该片的电阻。

对聚乙烯(PE)热缩管, 导热系数 $\lambda_p = 0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 表面辐射率 $\epsilon_p = 0.9$ 。

(4) 母线导体的热平衡方程。母线的热平衡计算是母线设计计算的主要内容, 主要是校核已经初步选定结构尺寸的母线, 在额定工况条件下长期运行时, 其各部位温升是否满足规定值, 即 $\Delta t_M \leq 40^\circ\text{C}$ (环境温度为 50°C 时)。将上述各量计算出后, 即可对母线导体列出热平衡方程式。单位长度母线导体的损耗发热量 P 为

$$P = I_M^2 \gamma_{M0} K_f$$

$$I_M = 1.05 I_e \quad (4.1-42)$$

$$\gamma_{M0} = \rho_{20} [1 + \alpha_{20} (t_M - 20)] / S$$

式中: I_M 为通过导体的长期最大工作电流, A; γ_{M0} 为母线导体 t_M ($^\circ\text{C}$) 时的单位长度直流电阻值, Ω/m ; 对铜母线电阻率为 $\rho_{20} = 0.0174 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, 电阻温度系数为 $\alpha_{20} = 0.00391/^\circ\text{C}$; K_f 为导体集肤效应系数, 可取为 1。

在热稳定的情况下, 这些热量分别以辐射散热量 Q_{MF} , 对流散热量 Q_{MD} 传给周围环境。若不考虑日照影响, 对于每相每米母线导体应满足热平衡式

$$P = Q_{MF} + Q_{MD} \quad (4.1-43)$$

在通常情况下, 母线的中相导体由于受两侧相的遮挡要更严重一些, 它在辐射换热的情况下, 其辐射换热的角系数更大, 因此中相要比两侧相的散热效果差, 温度也最高, 故在热计算过程中应计算中相。如果中相满足了温升要求, 其他两相也就肯定能满足。

4.1.3.2 矩形母线载流量的计算

用 $t_{xu} = 90^\circ\text{C}$ 代替式 (4.1-42) 中的 t_M , 再根据式 (4.1-43), 可求得导体的允许电流 (载流量) 为

$$I_{xu} = \sqrt{\frac{Q_{MF} + Q_{MD}}{\gamma_{M0} K_f}} \quad (4.1-44)$$

如果单片铜排的安全载流量不够, 可采用多片矩形母线叠成。叠成时, 两铜排的间隙与矩形母线截面宽度相同, 这样可使母线的热量易于散布到空气中去。但是由于每相母线铜排数目的增加, 其冷却条件比单片铜排差, 故安全载流量不是与片数成正比而是相应地有所减小。

(1) 单片母线载流量计算。A 相单位长度的热平衡方程

$$I_a^2 r_m = \alpha_{d1} (2h + 2b) (T_a - T_0) + \epsilon_a (h + 2b) \sigma (T_a^4 - T_0^4) + \frac{\sigma T_a^4 - J_a}{\left(\frac{1 - \epsilon_a}{\epsilon_a h}\right)} \quad (4.1-45)$$

式中: α_{d1} 为母线大空间自然对流换热系数; J_a 为 A 相表面的有效辐射; T_a 和 T_0 分别为 A 相母线和环境空气的热力学绝对温度; h 和 b 分别为铜排矩形截面的高度和宽度; I 为流过该片的电流; r_m 为该片的电阻; ϵ_a 为 A 相表面辐射率。

B 相导体单位长度的热平衡方程

$$I_b^2 r_m = \alpha_{d1} (2h + 2b) (T_b - T_0) + \epsilon_b 2b \sigma (T_b^4 - T_0^4) + 2 \frac{\sigma T_b^4 - J_b}{\left(\frac{1 - \epsilon_b}{\epsilon_b h}\right)} \quad (4.1-46)$$

式中: J_b 为 B 相表面的有效辐射; T_b 和 T_0 分别为 B 相母线和环境空气的热力学绝对温度。

当三相电流相等时, A 相和 C 相的温度相等, B 相温度最高。因此, 当母线电流已知后, 利用上述三个方程可求解 T_a 和 T_b , 由于上述两方程中还有 J_a 和 J_b 两个未知量, 需建立另外两个方程, 利用相间的辐射换热模型可得

$$\frac{\sigma T_a^4 - J_a}{\left(\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 h}\right)} + \frac{J_b - J_a}{\left(\frac{1}{h \varphi_{12}}\right)} + \frac{\sigma T_0^4 - J_a}{\left(\frac{1}{h(1 - \varphi_{12})}\right)} = 0 \quad (4.1-47)$$

$$\frac{\sigma T_b^4 - J_b}{\left(\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 h}\right)} + \frac{J_a - J_b}{\left(\frac{1}{h \varphi_{21}}\right)} + \frac{\sigma T_0^4 - J_b}{\left(\frac{1}{h(1 - \varphi_{21})}\right)} = 0 \quad (4.1-48)$$

式中: φ_{12} 和 φ_{21} 分别为 B 相对 A 相和 A 相对 B 相的角系数。

上述四个方程可解出 4 个未知数。如果已知 B 相铜排的最高温度, 由上述方程可确定铜排的载流量。

对于外敷热缩绝缘材料的母线, 按内部铜排温度确定载流量。只要外敷的热缩绝缘材料不是很厚, 不影响散热, 则载流量的计算与导体表面是否裸露、镀银或油漆无关。

首先由式 (4.1-45) ~ 式 (4.1-48) 计算出热缩绝缘材料外表面温度后, 再根据式 (4.1-41) 计算内部铜排温度。

单片铜排母线的载流量见表 4.1-4 ~ 表 4.1-6。该数据是按环境温度 50°C 、允许温升 40°C 时求得的, 相间距离大于 5m, 不考虑相间相互影响。表 4.1-4 为铜排表面油漆时、表 4.1-5 为铜排表面镀银时、表 4.1-6 为铜排表面外敷 1mm 厚热缩绝缘材料的载流量表。

当相间距离较近, B 相的温度将高于 A 相和 C 相, 载流量应按 B 相温度确定。考虑相间距离影响后的载流量可用式 (4.1-45) ~ 式 (4.1-48) 计算; 也可查表 4.1-8 利用单片矩形母线相间距离系数 C_x 进行修正。根据表 4.1-4 ~ 表 4.1-6, 查出单片母线的载流量 I , 再由 $I_{xu} = C_x I$ 确定实际相间距情况下的载流量。

当环境温度改变时, 实际的矩形铜排母线载流量还需按式 (4.1-49) 进行修正。

实际环境温度为 θ 时的载流量为

$$I'_{xu} = I_{xu} \sqrt{\frac{90 - \theta}{40}} \quad (4.1-49)$$

式中: I_{xu} 是环境温度为 50°C , 铜母排长期稳定运行允许的最高温度为 90°C 时的载流量。

(2) 两片母线载流量计算。对于三相两片矩形母线铜排的热平衡方程, A 相第一片导体单位长度的热平衡方程为

$$I_{a1}^2 r_m = \alpha_{d1} (h + 2b) (T_{a1} - T_0) + \alpha_{d2} h (T_{a1} - T_0) + \epsilon_{a1} (h + 2b) \sigma (T_{a1}^4 - T_0^4) + \epsilon_s h \sigma (T_{a1}^4 - T_{a2}^4) \quad (4.1-50)$$

式中: α_{d1} 和 α_{d2} 分别为母线大空间自然对流换热系数和母线片间窄通道中的自然对流换热系数。

A 相第二片导体单位长度的热平衡方程为

$$I_{a2}^2 r_m = \alpha_{d1} (h + 2b) (T_{a2} - T_0) + \alpha_{d2} h (T_{a2} - T_0) + \epsilon_{a2} (h + 2b) \sigma (T_{a2}^4 - T_0^4) + \epsilon_s h \sigma (T_{a2}^4 - T_{a1}^4) + \frac{\sigma T_{a2}^4 - J_{a2}}{\left(\frac{1 - \epsilon_{a2}}{\epsilon_{a2} h}\right)} \quad (4.1-51)$$

B 相第一片导体单位长度的热平衡方程为

$$I_{b1}^2 r_m = \alpha_{d1} (h + 2b) (T_{b1} - T_0) + \alpha_{d2} h (T_{b1} - T_0) + \epsilon_{b1} (h + 2b) \sigma (T_{b1}^4 - T_0^4) + \frac{\sigma T_{b1}^4 - J_{b1}}{\left(\frac{1 - \epsilon_{b1}}{\epsilon_{b1} h}\right)} \quad (4.1-52)$$

式中： J_{a2} 和 J_{b1} 分别为 A 相第二片和 B 相第一片表面的有效辐射。

当三相电流相等时，B 相两片的温度相同，两片间的辐射换热为零。因此，当母线电流已知后，利用上述三个方程可求解 T_{a1} 、 T_{a2} 和 T_{b1} ，由于三方程中还有 J_{a2} 和 J_{b1} 两个未知量，需建立另外两个方程，利用相间的辐射换热模型可得

$$\frac{\sigma T_{a2}^4 - J_{a2}}{\left(\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 h}\right)} + \frac{J_{b1} - J_{a2}}{\left(\frac{1}{h\varphi_{12}}\right)} + \frac{\sigma T_0^4 - J_{a2}}{\left(\frac{1}{h(1-\varphi_{12})}\right)} = 0 \tag{4.1-53}$$

$$\frac{\sigma T_{b1}^4 - J_{b1}}{\left(\frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 h}\right)} + \frac{J_{a2} - J_{b1}}{\left(\frac{1}{h\varphi_{21}}\right)} + \frac{\sigma T_0^4 - J_{b1}}{\left(\frac{1}{h(1-\varphi_{21})}\right)} = 0 \tag{4.1-54}$$

式中： φ_{12} 和 φ_{21} 分别为 B 相第一片对 A 相第二片和 A 相第二片对 B 相第一片的角系数。上述五个方程可解出 5 个未知数。根据 B 相铜排的最高温度，由上述方程可确定铜排的载流量。

(3) 三片和四片铜排载流量的计算。三片和四片矩形铜排载流量的计算方法和两片矩形铜排载流量的计算方法相同。

表 4.1-7 为每相二片、三片和四片表面油漆铜排母线载流量表，该数据是按环境温度 50℃、允许温升 40℃时求得的，相间距离大于 5m，不考虑相间相互影响。

(4) 母线实际载流量的修正计算。当相间距离较小，B 相的温度将高于 A 相和 C 相，载流量应按 B 相中温度最高片的温度确定。多片矩形母线实际载流量的计算应根据相间距、每相母线片数和实际环境温度进行修正。

考虑相间距离影响后的载流量可用式 (4.1-50) ~ 式 (4.1-54) 计算，也可查表 4.1-8，利用单片矩形母线相间距离系数 C_x 进行修正。考虑片数的影响进行修正时，首先根据表 4.1-7，查出多片母线的载流量 I ，再由 $I_{\text{实}} = C_P C_x I$ ，确定多片矩形母线实际相间距情况下的载流量。其中 C_P 为片数修正系数，片数 $P=2$ ， $C_P=1.003$ ；片数 $P=3$ ， $C_P=1.066$ ；片数 $P=4$ ， $C_P=1.089$ 。

若环境温度发生变化，实际载流量的计算用式 (4.1-49) 进一步修正。

表 4.1-4 单片表面油漆矩形铜排的载流量 A

高 h (mm)	宽 b (mm)						
	2	3	4	5	6	8	10
15	155	195	230	260	290	345	400
20	200	250	295	335	370	440	505
25	250	310	360	410	455	535	610
30	295	365	425	480	535	630	715
40	385	480	555	625	690	810	920
50	480	590	685	770	850	1000	1125
60	570	700	815	916	1010	1175	1330
80	750	920	1070	1200	1320	1540	1740
100	930	1140	1320	1480	1630	1900	2140
120	1110	1360	1580	1770	1940	2250	2540
160	1460	1800	2080	2330	2560	2960	3340

表 4.1-5 单片表面镀银矩形铜排的载流量 A

高 h (mm)	宽 b (mm)						
	2	3	4	5	6	8	10
15	120	150	175	195	215	255	290
20	155	190	220	250	275	325	370
25	190	235	270	305	335	395	445
30	220	275	320	360	395	460	520
40	290	355	415	465	510	595	670
50	355	435	505	570	625	730	820
60	420	515	600	675	740	860	970
80	550	680	785	880	965	1120	1260
100	680	835	970	1080	1190	1380	1550
120	810	990	1150	1290	1410	1640	1840
160	1065	1310	1510	1690	1860	2150	2410

表 4.1-6 单片表面外敷热缩管绝缘材料
矩形铜排的载流量 A

高 h (mm)	宽 b (mm)						
	2	3	4	5	6	8	10
15	150	185	220	250	280	330	385
20	195	240	285	320	355	425	485
25	240	295	345	390	435	515	585
30	285	350	410	465	510	605	685
40	370	460	535	605	665	780	885
50	460	565	660	740	820	960	1080
60	545	675	780	880	970	1130	1280
80	720	890	1030	1150	1270	1480	1670
100	890	1100	1270	1430	1570	1830	2050
120	1070	1310	1520	1700	1870	2180	2450
160	1410	1730	2000	2250	2470	2860	3210

表 4.1-7 多片表面油漆矩形铜排的载流量 A

矩形母线截面尺寸 $h \times b$ (mm×mm)	每相母线片数		
	2	3	4
60×6	1500	1600	1860
60×8	1750	1920	2240
60×10	2000	2200	2600
80×6	1950	2070	2380
80×8	2300	2450	2840
80×10	2600	2800	3280
100×6	2400	2550	2890
100×8	2800	3000	3440
100×10	3200	3400	3950
120×10	3750	4000	4620
140×10	4300	4600	5280
160×10	4880	5200	5940

表 4.1-8 单片矩形母线的相间距离系数 C_s

高 h (mm)	相邻两相母线的相间距离 a (m)										
	0.04	0.05	0.06	0.08	0.1	0.12	0.16	0.2	0.3	0.5	5
15	0.965	0.970	0.976	0.982	0.985	0.987	0.991	0.992	0.995	0.996	1.0
20	0.952	0.962	0.966	0.974	0.979	0.982	0.987	0.990	0.993	0.996	1.0
25	0.938	0.949	0.956	0.966	0.973	0.977	0.983	0.987	0.990	0.995	1.0
30	0.923	0.937	0.945	0.958	0.966	0.972	0.979	0.983	0.989	0.994	1.0
40	0.899	0.915	0.925	0.941	0.952	0.960	0.970	0.976	0.984	0.990	1.0
50	0.876	0.893	0.905	0.925	0.939	0.949	0.961	0.969	0.979	0.988	1.0
60	0.854	0.875	0.889	0.911	0.927	0.938	0.952	0.962	0.975	0.986	1.0
80	0.822	0.842	0.858	0.883	0.901	0.914	0.933	0.945	0.963	0.977	1.0
100	0.799	0.820	0.836	0.862	0.881	0.897	0.918	0.935	0.955	0.974	1.0
120	0.783	0.801	0.817	0.844	0.864	0.880	0.906	0.921	0.947	0.969	1.0
160	0.757	0.774	0.787	0.813	0.834	0.850	0.877	0.898	0.928	0.958	1.0

4.1.4 母线短路动稳定校验

动稳定性是指母线导体在短路电力作用下不发生失稳或变形、不被破坏的能力。设计选择母线时，必须进行动稳定校验。

4.1.4.1 校验要求

母线的动稳定校验要求母线系统在短路持续时间内能够承受因短路电流而产生的巨大电动应力的作用，以及在自振频率上满足机械共振的稳定条件。

(1) 母线导体最大短路应力 σ 应小于或等于导体材料的允许应力 σ_{xu} ，即 $\sigma \leq \sigma_{xu}$ 。

(2) 绝缘子支持点最大反力（弯曲力） R 应小于或等于绝缘子的允许载荷 p_{xu} 或 p'_{xu} ，即 $R \leq p_{xu}$ （受拉伸载荷时）或 $R \leq p'_{xu}$ （受弯曲载荷时）。

4.1.4.2 校验计算

母线动稳定校验要求可转化成计算以下四点：

- (1) 计算短路电流通过硬母线时产生的最大电力。
- (2) 计算机械强度（最大应力）确定的母线绝缘子最大允许跨距。
- (3) 计算机械共振条件确定的母线绝缘子最大允许跨距。
- (4) 计算绝缘子支持点的最大反力（弯曲力）。

本节的校验计算针对三相（多片）矩形水平立放（平放）母线系统，如图 4.1-22 所示。当发生三相短路且流过短路冲击电流时，中相母线相间短路电力效应最大；每相主母线由多片子母线组成时，中相主母线所受相间短路电力效应与中相边片子母线所受片间短路电力效应之和最大，故以这两种情况校验母线导体的短路动稳定性。

(1) 计算短路电流通过硬母线时产生的最大电力。以下计算是指单位长度母线所受到的最大短路电力（N/m）

1) 单片矩形母线。单片矩形母线系统只需计算中相母线最大相间电力，计算公式为

$$F_m = \frac{\sqrt{3} K i_{sh}^2}{a} \times 10^{-7} \quad (4.1-55)$$

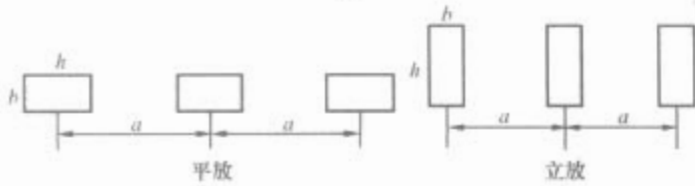


图 4.1-22 三相矩形母线水平布置

式中： K 为母线形状系数，可查图 4.1-23； i_{sh} 为母线三相短路冲击电流，A； a 为相邻两相母线的相间中心距离，m。

2) 多片矩形母线。最大电力包括中相主母线所受相间短路电力 F_m 和中相边片子母线所受片间短路电力 F_s 。相间短路电力计算同式 (4.1-55)；片间短路电力计算公式如下。

$$\text{每相由两片片子母线组成时, } F_s = K_{12} i_{sh}^2 \times 10^{-7} / 4b \quad (4.1-56)$$

$$\text{每相由三片子母线组成时, } F_s = (2K_{12} + K_{13}) i_{sh}^2 \times 10^{-7} / 18b \quad (4.1-57)$$

$$\text{每相由四片子母线组成时, } F_s = (6K_{12} + 3K_{13} + 2K_{14}) i_{sh}^2 \times 10^{-7} / 96b \quad (4.1-58)$$

K_{12} 、 K_{13} 、 K_{14} 分别为边片子母线与同相其他子母线的片间形状系数，可查图 4.1-23。

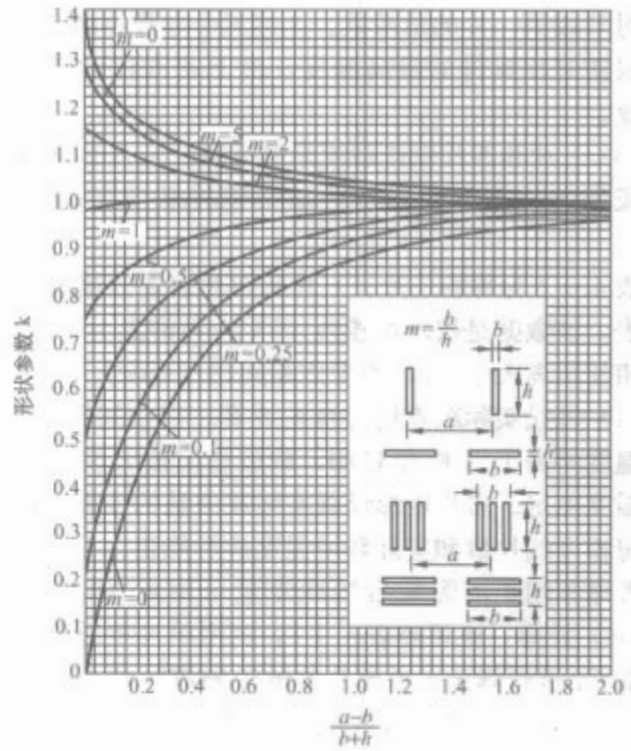


图 4.1-23 矩形母线形状系数

(2) 计算机械强度确定的母线绝缘子最大允许跨距。短路电流通过硬母线产生的应力 σ (Pa) 定义为

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad (4.1-59)$$

式中： M 为短路电流在硬母线上产生的力矩（或弯矩）， $N \cdot m$ ； W 为母线截面与电力方向相垂直的轴的截面系数， m^3 。

1) 单片矩形母线。力矩 M 与三相母线布置的具体结构有关，当母线跨数 ≤ 2 时， $M = F_m l^2 / 8$ ，当母线跨数 > 2 时， $M = F_m l^2 / 10$ 。 l 为母线绝缘子的跨距； W 为母线的截面系数，对水平平放母线， $W = bh^2 / 6$ ，对水平立放母线， $W = b^2 h / 6$ 。

导体材料的最大允许应力，硬铜为 $\sigma_{xu} = 140 \text{ MPa}$ ，硬铝 $\sigma_{xu} = 70 \text{ MPa}$ 。

若计算结果不能满足 $\sigma_m \leq \sigma_{xu}$ 时，可采取下列措施：
①减小跨距 l ；②增大母线的相间距离 a ；③增大母线的截面积 $S = bh$ 。

为了便于计算和施工，可根据材料的最大允许应力来确定母线的最大允许跨距 l_{max}

$$l_{max} = \sqrt{8 \sigma_{xu} W / F_m} \quad (\text{母线跨数} \leq 2) \quad (4.1-60)$$

$$\text{或 } l_{max} = \sqrt{10 \sigma_{xu} W / F_m} \quad (\text{母线跨数} > 2) \quad (4.1-61)$$

若取 $l \leq l_{max}$ ，则满足动稳定要求。

2) 多片矩形母线。母线最大短路电动应力由主母线相间应力 σ_m 和同相子母线片间应力 σ_s 叠加而成, 即

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_s \tag{4.1-62}$$

式中, 相间应力 σ_m 仍用式 (4.1-59) 计算, 但 W 应为多片矩形母线导体的截面系数。对水平平放的每相多片矩形母线系统, $W=n \cdot b^2 h/6$, n 为子母线片数; 对水平立放的每相多片矩形母线系统, $W_2=1.44b^2 h$, $W_3=3.3b^2 h$, $W_4=5.81b^2 h$ 。

W_2 、 W_3 、 W_4 是每相子母线分别为 2 片、3 片、4 片时的多片矩形母线截面系数。

边片子母线导体所受弯矩 M_s 可按两端固定的匀载荷梁计算

$$M_s = F_s l_s^2 / 12 \tag{4.1-63}$$

式中: F_s 为单位长度母线导体所受的片间电动力, N/m; l_s 为片间衬垫跨距, m。

片间作用应力为

$$\sigma_s = M_s / W_s = F_s l_s^2 / 12 W_s \tag{4.1-64}$$

式中: W_s 为单片矩形母线截面垂直于电动力方向的轴的截面系数。

若多片矩形母线的最大应力 $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_s \leq \sigma_{xu}$, 则母线满足动稳定要求。

取 $l_{max} = l_{stmax}$, 并按材料的最大允许应力可确定多片矩形母线绝缘子的最大允许跨距。

也可根据片间允许应力 σ_{sxu} (其值为 $\sigma_{xu} - \sigma_m$) 来确定最大允许衬垫跨距 l_{stmax}

$$l_{stmax} = \sqrt{12 \sigma_{sxu} W_s / F_s} \tag{4.1-65}$$

若取 $l_s \leq l_{stmax}$, 则母线满足动稳定要求。

(3) 计算由机械共振条件确定的母线绝缘子最大允许跨距。为避免共振产生的巨大电动力破坏, 应计算母线的固有振动频率, 使其分布在可能的共振频率范围以外, 实在无法避免时, 应进行相关修正。

1) 计算母线的固有振动频率。在考虑母线作为单自由度的振动系统中, 可将母线系统视为两端固定的超静定直梁, 对三相无自动重闭的矩形母线系统, 母线固有振动频率 f_c (Hz) 的计算公式如下。

单片矩形母线系统 $f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \tag{4.1-66}$

多片矩形母线系统主母线 $f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \tag{4.1-67}$

多片矩形母线系统子母线 $f_{cs} = \frac{3.56}{l_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \tag{4.1-68}$

式中: γ 为频率系数, 与绝缘子支持点的类型和数量有关, 见表 4.1-9; E 为母线材料的弹性模量, 铜质母线为 $73.5 \times 10^9 \sim 127 \times 10^9$ N/m²; J 为母线导体截面积的惯性矩, m⁴; J_s 为单片矩形母线截面积的惯性矩, m⁴; m' 为单位长度母线导体的质量, kg/m; m'_s 为单位长度单片矩形母线的质量, kg/m; l 为母线绝缘子的跨距, m。

表 4.1-9 频率系数 γ 值

固支 1跨	简支 1跨	简支 2跨	简支 3跨	简支 4跨	简支 5跨	简支 6跨	简支 7跨	简支 8跨
3.56	1.57	2.45	2.95	3.16	3.30	3.34	3.42	3.56

2) 计算母线系统避免共振的最大允许跨距。最大共振幅值发生在两倍工频 100Hz 处, 考虑到母线系统的振动阻尼, 应将母线的自振频率限制在 100Hz 以上。由于短路电动力的频谱均分布于 160Hz 以下, 工程中可以 155Hz 作为母线自振频率下限, 计算机械共振条件下母线绝缘子的最大

允许跨距。

单片矩形母线系统最大允许跨距为

$$l_{0max} = \sqrt{\frac{\gamma}{155}} \sqrt{\frac{EJ}{m}} \tag{4.1-69}$$

多片矩形母线系统, 主母线最大允许跨距 l_{0max} 和子母线衬垫最大允许跨距 l_{0stmax} 计算公式为

$$l_{0max} = \sqrt{\frac{\gamma}{155}} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \tag{4.1-70}$$

$$l_{0stmax} = \sqrt{\frac{3.56}{155}} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} \tag{4.1-71}$$

所以, 设计、选择、校验母线时, 母线跨距应满足以下条件。

主母线跨距 $l \leq l_{max}$, 且 $l \leq l_{0max}$ 。

子母线衬垫 $l_s \leq l_{stmax}$, 且 $l_s \leq l_{0stmax}$ 。

额定电压为 0.4kV 的变、配电系统中母线绝缘子支持点, 跨距应不大于 0.9m, 若跨距大于 0.9m 且无法加设支持点时, 应加设母线绝缘夹板。

(4) 计算绝缘子支持点最大反力 (弯曲力)。

1) 计算绝缘子允许载荷。支持绝缘子的机械强度安全系数, 短路校验时不应低于 1.67。当绝缘子顶部的破坏载荷为 P 时, 拉伸允许载荷为

$$P_{xu} = P / 1.67 \tag{4.1-72}$$

校验抗弯强度时, 应将其顶部的允许载荷换算至母线作用力中心的位置上, 即

$$P'_{xu} = PH_w / (1.67 H'_w) \tag{4.1-73}$$

式中: P 为绝缘子顶部的破坏载荷; H_w 和 H'_w 分别表示绝缘子危险截面至顶部和母线轴心之距离。

2) 计算绝缘子支持点最大反力 (弯曲力)。计算母线绝缘子支持点最大反力 (弯曲力)

$$R = \alpha V_F F_m \tag{4.1-74}$$

式中: α 为支持点反力 (弯曲力) 系数, 内支持点受力最大, 相关系数见表 4.1-10; V_F 为支持点动态应力与静态应力之比。

表 4.1-10 α 系数表

固支 1 跨	简支 1 跨	简支 2 跨	简支 3 跨及以上
0.5	0.5	1.25	1.1

三相短路时, V_F 值见表 4.1-11

表 4.1-11 V_F 值

f_c/f	V_F
<0.04	$0.232 + 3.52e^{-1.45\pi} + 0.166 \lg(f_c/f)$
$0.04 \sim 0.8$	取 V_{F1} 和 V_{F2} 的最大值 $V_{F1} = 0.839 + 3.52e^{-1.45\pi} + 0.6 \lg(f_c/f)$ $V_{F2} = 2.38 + 6.00 \lg(f_c/f)$
$0.8 \sim 1.2$	1.8
$1.2 \sim 1.6$	$1.23 + 7.2 \lg(f_c/f)$
$1.6 \sim 2.4$	2.7
$2.4 \sim 3.0$	$8.59 - 15.5 \lg(f_c/f)$
$3.0 \sim 6.0$	$1.50 - 0.646 \lg(f_c/f)$
>6.0	1.0

注 f 为系统频率 (Hz), κ 为短路电流冲击系数, 若 $\kappa \geq 1.6$, 表中计算取 $\kappa = 1.6$; f_c 为母线固有振动频率, 按式 (4.1-66) 和式 (4.1-67) 计算。

4.1.5 矩形母线短路热稳定校验

热稳定性,是指在短路持续时间内母线导体承受短路电流产生的热效应而不致损坏的能力。设计选择母线时,必须进行热稳定性校验。

4.1.5.1 校验要求

母线的热稳定性校验,要求母线系统在短路时的最高温度不能超过母线导体允许的最高温度,铜质母线为 300℃,铝质母线为 200℃;或者母线导体的截面积大于满足热稳定性要求的最小截面积,即 $S > S_M$ 。

4.1.5.2 校验计算

母线短路热稳定计算按绝热过程考虑,短路过程中母线导体的发热量等于导体温度升高所吸收的热量。由于导体的温度上升得很高,导体的电阻率和比热是随温度而变化的,短路电流的变化规律也很复杂,故很难直接计算出短路热效应导致的温升。所以,短路热稳定校验时,可用母线导体材料的最高允许温度,计算其满足短路热稳定要求所需的最小截面积 S_M ,再判断所选母线截面积是否大于最小截面积。若不满足,则要增大母线导体的截面尺寸。

最小允许截面积 S_M (mm^2) 定义为

$$S_M = \frac{\sqrt{Q_d}}{C} \tag{4.1-75}$$

C 为发生短路时母线的温度热稳定系数 ($\text{A/s} \cdot \text{mm}^2$),不同温度下的热稳定系数 C 值见表 4.1-12。

Q_d 为总的短路电流热效应 ($\text{A}^2 \cdot \text{s}$),近似等于周期分量热效应与非周期分量热效应之和,即

$$Q_d = Q_{dd} + Q_{dn} \tag{4.1-76}$$

Q_{dd} 为短路电流周期分量热效应

$$Q_{dd} \approx \frac{I''^2 + 10I_{d,t_d/2}^2 + I_{d,t_d}^2}{12} t_d \tag{4.1-77}$$

Q_{dn} 为短路电流非周期分量热效应

$$Q_{dn} \approx (1 - e^{-2t_d/T_n}) T_n I''^2 \tag{4.1-78}$$

式中: I'' 为初瞬间短路电流周期分量有效值, A ; $I_{d,t_d/2}$ 为 $t_d/2$ 时刻短路电流周期分量有效值, A ; I_{d,t_d} 为 t_d 时刻短路电流周期分量有效值, A ; T_n 为短路电流非周期分量衰减时间常数, s ; t_d 为短路电流持续时间,等于继电保护时间与相应的断路器全分闸时间之和, s 。

为简化计算,有时可取 $I_{d,t_d} = I_{d,t_d/2} = I''$ 进行校验,但此时计算得到的最小截面积比实际值偏大。

表 4.1-12 不同工作温度下的 θ 值

θ ($^{\circ}\text{C}$)	50	55	60	65	70	75	80	85	90
铝裸导体	96	94	92	90	88	86	84	82	80
铜裸导体	182	180	177	175	172	170	168	165	163

4.2 船用电缆的计算和选择

电缆的选择应根据敷设场所的环境条件、敷设方法、电流定额、工作定额、需用系数和允许电压降等因素来确定。

电缆的额定电压不应低于其所在电路的额定电压。容易遇到例如接触器操作的起货机电路等高电感电路所产生的冲击电压的电缆,须作特殊考虑。

根据 IEC 92-353—1988《额定电压 0.6/1kV 挤出固体绝缘单芯和多芯电缆》规定,电缆直流额定电压为交流额定电压的 1.5 倍。

上述限定因素确定后,即可据此选择电缆的绝缘材料、

电缆的保护层、电压等级、芯线数,从而选定电缆型号;再根据电缆的发热不超过允许工作温度和网路中的电压损失不超过允许值的要求,选定电缆截面,即选定电缆规格。进而完成电缆的选择。

4.2.1 电缆型号的选择

包括绝缘材料、保护层、芯线数等的选择。

4.2.1.1 绝缘材料的选择

绝缘材料最高工作温度,至少应比电缆安装场所可能存在的最高环境温度高 10℃。

同一艘船上应尽量选用导体长期允许工作温度相同的电缆,否则导体长期允许工作温度相差超过 5℃ 的电缆应分束敷设。若有困难,则成束中所有电缆的额定电流都应按导体长期允许工作温度最低的电缆额定电流设计。

电缆绝缘材料一般应根据表 4.1-13 来选用。若选用其他绝缘材料应经相关部门同意。

表 4.1-13 绝缘材料的最高工作温度

绝缘材料	导体最高工作温度 ($^{\circ}\text{C}$)	最高环境温度 ($^{\circ}\text{C}$)
弹性复合物	—	—
乙丙橡皮	85	75
交联聚乙烯	85	75
硅橡皮	95	85
热塑性复合物	—	—
聚氯乙烯	60	50
其他材料	95	85
矿物	—	—

注 1. 硅橡皮和矿物绝缘,当它们安装在船员不易接触的地方时,可允许较高的工作温度(如硅橡皮为 150℃;矿物绝缘则不作限制)但须相关部门同意。
2. 导体的温度系环境温度与负载所产生的温升之和。

4.2.1.2 保护层的选择

(1) 在机、炉舱等多油场所的电缆应选用耐油性能优良的护套。固定敷设在露天甲板、潮湿处所(如浴室)、冷藏处所、机舱和通常有凝结水或有害气体(如油汽)处所的电缆应有挤包护套。

(2) 根据传输信号的种类和频率、电平、电缆线芯之间及各类电缆之间的电磁兼容性要求,选择电缆的型号和规格。

(3) 可携带式电气设备应选择软电缆,频繁移动场所应选用特软电缆。岸电供电电缆应选择软电缆。

(4) 在容易受到机械损伤的场所应选用与使用场所相适应的铠装电缆。带有金属铠装层的电缆,敷设在容易受到腐蚀的场所或金属铠装层需要单点接地时,应选用金属铠装层外加防蚀护套的电缆。

(5) 按电缆在火焰条件下的燃烧特性,至少选用符合单根电缆燃烧试验要求的阻燃电缆,有要求时,应选用符合成束电缆燃烧试验要求的阻燃电缆。

(6) 通过耐火区或耐火系统用的电缆,应选用耐火型电缆。

4.2.1.3 芯线数选用

(1) 交流系统和直流系统应尽量避免采用单芯电缆。若在交流系统中必须采用单芯电缆时,则电缆应为非铠装型,或以非磁性材料铠装。

(2) 选择多芯电缆时,应考虑备用线芯。实用线芯数为 5~16 根,备用线芯数为 1~2 根;实用线芯数 19~37 根

时,备用线芯数为2~4根。

4.2.2 电缆截面积(电缆规格)的确定

通常,把选择电缆截面时所作的计算,称为网路计算。选取电缆截面必须满足两个要求:

- (1) 电缆的发热不超过允许工作温度。
- (2) 网路中的电压损失不超过允许值。

根据上述要求,应当计算两个不同条件所要求的电缆截面,比较其结果,取用其中较大的。

为了提高工作效率,使计算简便、合理,需要对上的两个要求作出分析。

从网路计算的角度出发,船舶网路有两种线路。即“短线路”和“长线路”。如按发热条件计算的截面大于按电压损失要求计算的截面,这样的线路称为“短线路”。反之,按电压损失要求计算的截面大于按发热条件计算的截面时,这样的线路称为“长线路”。对“短线路”来说,按发热条件来选择电缆截面,必然满足电压损失的要求;对“长线路”来说,按电压损失来选择电缆截面,必须满足发热的要求。

经实践统计表明,中、小型船舶的动力网路一般都属于“短线路”,照明网路,特别是低压照明网路,大多是“长线路”。

按照规范的要求,照明网路电缆的截面要根据网路电压损失来计算。对于其他网路,可以先按发热条件来预选截面,然后再校核电压损失是否超过允许值。这种校核之所以必要,是由于并不能在各种条件下都能立即判断出网路的性质是“短线路”还是“长线路”。

4.2.3 按发热要求选择电缆截面

电缆导体截面积应根据电气设备额定电流、工作制、同时工作系数、环境温度、敷设情况等因素确定。所选电缆的额定电流值应等于或大于该电缆所在电路的总负载电流(总接入负载电流与总接入负载采用的需用因数之乘积)。

对于交流配电系统和照明系统的电路,应根据接入负载电流的矢量和来确定总接入负载。当各个接入负载的功率因数相差不大于0.25时,可根据其算术和来得出总接入负载。如负载电流是按算术和得出的,则在计算电压降时所取的功率因数,应是所加负载中起主导作用的功率因数。直流配电系统电路的总接入负载电流,应为接入负载的额定负载电流之和。对于未具体指明负载的每个交流或直流插座,应考虑增加功率的裕量。对专门给停泊照明插座供电的插座电路,应采用如表4.1-14所示负载系数来确定隔离变压器(要求最小规格为3kVA)和来自熔断器盒或配电板的电缆规格。

表 4.1-14 负载系数

一个电路内的插座数	负载系数
1~3	1.00
4~6	0.75
7~9	0.65
10~11	0.60
12~15	0.55

照明系统和配电系统电路的总负载电流应按如下要求确定。

(1) 照明系统。

1) 支线。接入负载额定值的矢量和。

2) 干线分支。所有支线电路接入负载矢量和得到的最大线电流。

3) 干线。所有接入干线分支的接入负载电流矢量和。

4) 馈线。馈线需用因数与所有接入干线的三相总负载电流的矢量和之乘积。

5) 在确定照明电路的电流定额时,每一灯头必须按能与它连接的最大负载计算,但最小为60W。若装置的结构只能装接定额低于60W的灯者,则可除外。

每个照明插座应按二个灯头计算。

(2) 配电系统。

1) 单个负载。设备的额定电流。

2) 两个或多个负载。总接入负载电流与需用因数的乘积如不能确定需用因数,其值可取0.9。

3) 发电机的馈线。发电机的额定电流。

4) 船舶主汇流排跨接电缆。根据负载计算书可能出现的最大电流。

5) 应急汇流排跨接电缆。应急配电板额定电流。

6) 岸电馈线电缆。根据负载计算书可能出现的最大岸电负载电流。

7) 主汇流排与负载中心或区配电板汇流排之间的连接电缆。接入负载中心或区配电板的总负载电流。

8) 停泊汇流排跨接电缆。停泊发电机的额定电流之和。

9) 电动发电机组配电板之间的连接电缆。按(接至一块配电板的)最大容量发电机的额定电流。

10) 馈电给起货机或旋转起重机、起锚机及绞缆机的电缆定额,应与工作制相适应。

4.2.4 按电压损失要求选择电缆截面

(1) 当电缆在正常工作条件下应能承载最大负载和最远支线的线路电压降的限值,一般应满足下列规定。

1) 照明系统。

a. 交流主照明系统的线路电压降,不得大于额定电压的6%;直流主照明系统的线路电压降,不得大于额定电压的8%。

b. 交流应急照明系统的线路电压降,不得大于额定电压的12%;直流应急照明系统的线路电压降,不得大于额定电压的15%(24V除外)。

2) 配电系统。

a. 交流主配电系统的配电板至负载间电缆长度不大于150m时的线路电压降不得大于额定电压的6%;直流主配电系统的配电板至负载间电缆长度不大于150m时的线路电压降不得大于额定电压的8%;跨接电缆的线路电压降不得大于额定电压的2%。以上限值不包括变压器调压的要求。

b. 当采用蓄电池供电电压不超过50V时的线路电压降不得大于额定电压的10%。

c. 当线路电压降超过以上限值时,允许采用电缆并联来满足线路电压降的限值要求,或另外选择适当的电缆使线路电压降减至限值内以满足线路负载的要求。

(2) 照明系统和配电系统计算电压损失时其电路总负载电流的确定方法与本篇4.2.3.3的要求相同。照明系统电路电压损失应按总接入负载电流计算。配电系统计算总负载电流时,负载同时系数应适当取大些。

(3) 直流网路电压损失

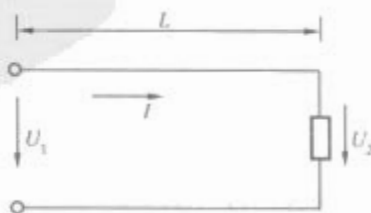
计算。给一个负载供电的电路如图4.1-24所示。

电压损失

$$\Delta U = U_1 - U_2 = 2IR$$

(4.1-79)

其中R为一根导线的电阻。图4.1-24 负载供电的电路



将 $R=\rho \frac{L}{S}$ 代入式 (4.1-79), 得

$$\Delta U=\frac{2 \rho L I}{S} \quad(\mathrm{V})$$

$$\rho=\rho_{20}[1+\alpha(\theta-20)]$$

式中: L 为 1 根导线的长度, m ; ρ 为铜的电阻系数。 ρ_{20} 为铜导体 +20℃ 时的电阻系数, $0.0184 \Omega \cdot \mathrm{mm}^2 / \mathrm{m}$; α 为温度系数, $0.003921 / \mathrm{℃}$; θ 为线芯允许长期工作温度, $\mathrm{℃}$; I 为负载工作电流。

给沿线几个负载供电的电路, 其电压损失的计算可参看图 4.1-25 来进行。

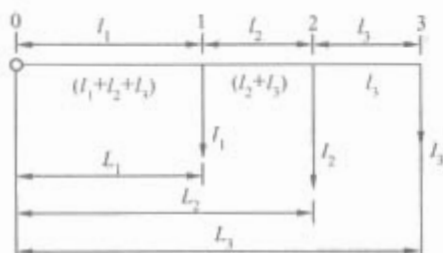


图 4.1-25 电压损失的计算参考图

对这种电路进行电压损失计算时, 应注意校核距电源最远的负载处的电压损失。因为此处电压损失最大。

为了工作可靠和安装工艺的方便, 一般干线各段电缆取相同的截面。

这种供电电路的电压损失计算方法如下:

总电压损失

$$\Delta U=\Delta U_1+\Delta U_2+\Delta U_3$$

一般形式

$$\Delta U=\frac{2 \rho}{S} \sum_{i=1}^n I_i L_i \quad(4.1-80)$$

如果各负载功率 P_i (kW) 已知, 则式 (4.1-80) 可写为

$$\Delta U=\frac{2 \rho}{U S} \sum_{i=1}^n P_i L_i \quad(4.1-81)$$

式中: I_i 和 P_i 分别称为电流矩和功率矩。

一般说来, 进行电压损失的计算时, 应将各段网路上的电压损失算出来, 然后相加得到从电源到负载总的电压损失。

(4) 交流网路电压损失计算。交流网路电压损失的计算方法与直流网路不同的地方有三点:

1) 线路中除电阻 R , 还有感抗 X 。

2) 负载是非阻性负载时, 有负载功率因数 $\cos \varphi$ 的影响。

3) 三相交流网路中, 电压损失有“相”与“线”的区分。

当 $\cos \varphi \neq 1$ 时, 电压损失不等于电缆上的电压降。以对称三相交流网路为例, 各电压、电流间的关系如图 4.1-26 所示。

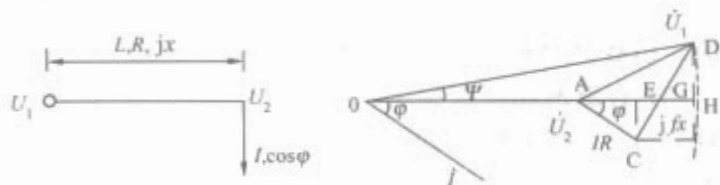


图 4.1-26 电压、电流间关系

因为 $GH=U_1-U_1 \cos \varphi$, φ 很小, 故 GH 可略去不计。所以

$$\Delta U=A E+E G=I R \cos \varphi+I X \sin \varphi$$

ΔU 即为一根电缆所产生的电压损失。对于单相电路, 总电压损失即为

$$\Delta U_S=2 \Delta U=2(I R \cos \varphi+I X \sin \varphi)$$

对于三相三线制电路, ΔU 即为一相的电压损失, 线电压损失等于相电压损失的 $\sqrt{3}$ 倍, 即

$$\Delta U_S=\sqrt{3} \Delta U=\sqrt{3}(I R \cos \varphi+I X \sin \varphi)$$

当电缆截面 S 选定后, 电压损失计算公式中的电阻 R 和感抗 X 值是可以从电缆技术资料中查取的 (见表 4.1-15)。

表 4.1-15 船用三芯电缆线芯的电阻和感抗值

($t=+20 \mathrm{℃}$, $f=50 \mathrm{Hz}$)

标称截面积 (mm^2)	电阻 R (Ω / km)	感抗 X (Ω / km)	标称截面积 (mm^2)	电阻 R (Ω / km)	感抗 X (Ω / km)
1	18.4	0.128	50	0.37	0.082
1.5	12.2	0.120	70	0.26	0.078
2.5	7.36	0.117	95	0.19	0.078
4	4.60	0.109	120	0.15	0.076
6	3.07	0.104	150	0.12	0.076
10	1.84	0.098	185	0.099	0.075
16	1.22	0.091	240	0.077	0.074
25	0.73	0.089	300	0.061	0.074
35	0.53	0.085	400	0.46	0.073

由表 4.1-15 可知, 在小截面的电缆中, 电阻 R 比感抗 X 大很多, 在负载功率因数不是很低的情况下, 电压损失中的主要分量是电阻降落。在进行工程计算时, 感抗的影响可略去不计。

4.2.5 电缆选择的附加容量

为保证能增加负载或扩充系统, 配电系统应有备用电流裕量, 该裕量值等于配电板或负载中心的备用断路器的容量。单个备用断路器的容量应等于现用断路器的平均容量。交流电路总接入负载的备用负载分量应按功率因数为 0.85 计算。

4.2.6 电路需多根电缆并联使用时, 一般应遵循原则

(1) 并联电缆的每根线芯导体截面积、导体长期允许工作温度和长度均应相同。

(2) 三相电路使用并联电缆时, 每根电缆均应为三芯。

(3) 单相交流或双线直流电路使用并联电缆时, 每根电缆均应为二芯。

(4) 多根单芯电缆并联使用时, 应符合包括电缆的相序排列、相位交换和接地等相关要求。

5 船舶区域配电系统

船舶配电系统由配电装置及相应的电力网络组成, 其基本功能是合理配置电能, 采取各种有效措施来保证用电设备得到最可靠的电力供应。传统的船舶配电系统主要采用径向式配电, 包括干线式、馈线式、干馈混合式、环形配电式等。目前许多国家正在研究实施区域配电系统作为下一代船舶电力系统的组成部分, 取代现行的径向式配电系统, 这将在提高生命力、减轻质量、减少人员配备以及降低总费用等

方面带来明显的效益。

5.1 径向式配电与区域配电的比较

5.1.1 径向式配电系统

径向式配电系统采用从主配电板直接供电和从主配电板经区配电板（或称为负载中心）供电相结合的配电方式。它一般配置多台发电机组和相应配电装置，各发电机组单机或并联运行，三相交流低压电源经主配电板、区配电板和分配电板（箱）向全船配电。变压器用于所需转换电压或为敏感负载提供隔离，变频器用于满足特殊频率负载需要。

径向式配电系统的电力是从主配电板和负载中心等一些集中位置，经由专用电缆直接配送给贯穿全船的用户负载。结果数以千计的电纜遍布全船，横穿隔舱壁并占用大量的空间用于安装和保护，配电系统在船舶设计和制造成本中占有很大的比例。在船上发生水灾或损坏事件时，实行电气隔离也很困难。随着科学技术的发展，大量新式设备陆续装备新一代船舶，电气化程度不断增高，对电力需求和电能品质也提出更高要求。现有的径向式配电系统的能力正趋于极限，已逐渐不能适应发展需要。

5.1.2 区域配电系统

区域配电与传统的径向式配电在结构上具有重大转变，两者的比较如图 4.1-27 所示。区域配电系统采用左舷及右舷主汇流母线方式，依据实船的水密隔舱将配电范围划分一定数量的配电区域。两条主汇流母线之间有两层甲板隔离，分别安装于吃水线的上方和下方，使得距离最大化，从而提高事故时的生命力。配电网的每条母线穿越全船各配电区域，通过负载中心向用电设备供电，而重要负载则通过自动母线转换装置与所在区域的两个负载中心相连。

区域配电用舷侧母线和负载中心取代了传统船舶配电系统中的多层母线，降低了船舶配电的费用。左侧和右侧船舷的母线都由发电模块供电，而自身则为所有的电力区域供电。每个配电区域相互独立，包含风机系统、冷却系统、电力配电系统以及其他日用电力系统。配电功能单元用于在其他各功能单元之间实现电力传输，它只和系统控制功能单元交换控制指令和数据信息。相应的配电模块则通常由电缆、开关及故障保护等设备组成。

区域配电结构的优点表现在如下三方面。

(1) 使配电分区界面与船舶的水密分区和结构分区界面

相重合，与整个船身的模块化建造相结合，有利于消防系统和空调系统的分区。

(2) 只有主汇流排母线穿过水密舱壁，使配电板馈线电缆大大减少，既降低了重量和造价又提高了船舶的生命力。

(3) 区域配电技术满足区域造船的要求，电缆敷设与区域建造可以同时进行，允许在区域合拢之前进行设备安装和试验，最后通过两条母线连接各供电区域即可，大大提高工作效率，降低生产费用。

船舶区域配电系统设计时要充分考虑电力区域的位置及覆盖面。为提高船舶生存能力和降低建造费用，有必要使电力区域的界线与防水隔离线和建造区域界线三者统一。但是，电力区域的实际数量和位置是综合权衡的结果，它牵涉到生产效率、生存能力、采购费用等众多因素。若电力区域跨过太多的防水隔离壁板，则配电系统在积水情况下的生存能力就会降低；若跨过太多的建造区域，则须预先铺设的电力电缆和数量也会增加，生产成本直线上升。另一方面，过多的小规模电力区域会增加负载中心的总数和元器件的采购数量，也增加了维修工作量。

5.2 船舶区域配电系统

根据主汇流母线所采用电制的不同，区域配电系统可分为交流区域配电和直流区域配电两种类型。

5.2.1 交流区域配电系统

交流区域配电系统的基本组成包括发电机配电板（含同步和并联控制器）、两条左右舷交流主汇流母线、负载中心、变压器、变频器、母线转换装置以及交流配电设备等。

由于 20 世纪交流电机技术的发展，使得交流电制特别受到青睐。目前世界各国船舶电力系统绝大多数都是采用交流电制，因此在区域配电概念提出之初采用交流电制似乎是唯一的选择，然而其一些固有矛盾限制了应用前景，主要有：

(1) 接入电网的所有发电机必须要有足够的阻尼以减少干扰谐波，而且这些发电机必须严格地同步，其特性必须匹配。

(2) 无功功率直接影响到电网的品质、电压及其损耗，对于大型船舶电力系统而言治理比较困难。

(3) 船舶各种现代化设备需要多种电制形式，交流电源不易进行相互灵活转换。

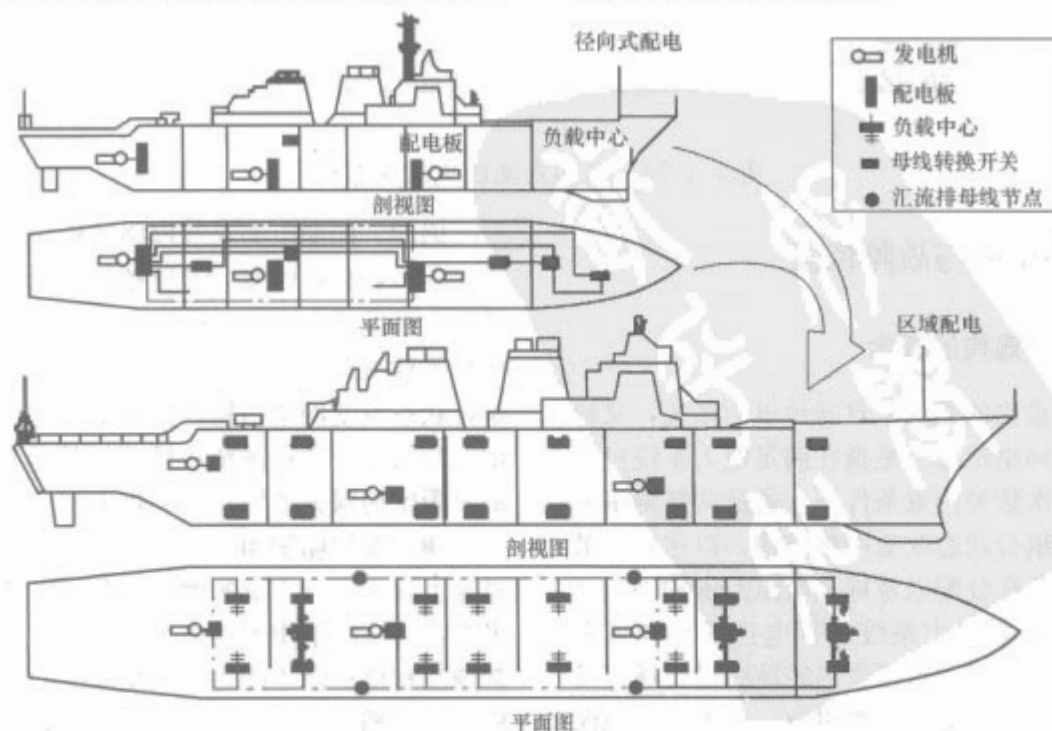


图 4.1-27 径向式配电与区域配电结构比较

当采用直流电制,或至少将输配电部分改为直流时,以上问题就可迎刃而解。因此,近年来国内外纷纷对直流区域配电展开了的研究与探索。

5.2.2 直流区域配电系统

直流区域配电系统基于直流电源分区结构,船舶非推进用电负载根据水密舱壁被分成各自独立的配电区域,通过沿左右舷配置的直流汇流母线向各区域供电。每个配电区域都有合适的变电、配电结构,以满足系统等级和各用电负载的电力接口要求,如图4.1-28所示。

直流区域配电系统基本组成包括发电机、既可以与发电机组组合在一起也可以单独设置的相控整流单元、将主汇流排母线接至配电区域的变电器模块、用于得到配电区域内额定交流电压的逆变器模块以及必要的控制、保护、检测和汇流排连接设备。发电机发出的交流电经整流后直接送往直流主汇流母线,包括电力变换模块的综合变电中心作为汇流母线和区域内电气负载的缓冲单元,将电能接入相应的配电区域并将汇流母线的电压调整为逆变器和其他负载所需的工作电压。左右舷直流母线相互不连在一起,以防止故障从一条母线传递到另一条母线。

直流区域配电具有以下优点:

(1) 采用直流母线代替交流母线,发电机运行频率与配电要求互不相关,可以使发电机和整流器的成本、尺寸、质量等达到最佳化、集成化,原动机也可以设计成在最经济的转速下运行,降低燃油消耗和热量散发。

(2) 变电器模块具有电力变换、检测、限流和保护等多项功能,消除了大型机电开关装置,直流输入使得电流传感器和故障检测装置设计简单且反应灵敏,故障情况可在一个

配电区域内处理,提高供电连续性和电源管理的自动化程度。

(3) 广泛采用现代电力电子技术,消除了大型机电变流设备并最小化发电和用电之间的电力转换级数,提供频率和电压范围广泛的交流电和多种电压的直流电,改善电能品质,减小电磁干扰。

(4) 易于对泵和风机等电动机负载进行调速控制,发挥其最大效能;还可以限制大容量电动机启动时逆变的冲击电流,有利于保持汇流排母线的电压稳定。

(5) 采用开放式模块化结构,允许采用适合于应用要求的不断变化的技术,界定了模块边界并确定了接口标准,使全船设备通用性、标准化、升级更新重复成本最小。

综上所述,由于在生命力、尺寸、质量、效率、高效能以及灵活性等方面的诸多优势,使得直流区域配电更优于交流配电而成为首选。

构建直流区域配电系统要求综合利用各种船用新技术解决设备互连、系统稳定性、电磁兼容和电能品质等问题。现代船舶的发展使电力系统容量越来越大,同时对生命力的要求也越来越高。船舶设计中的区域直流配电正在从概念走向实际工程,从不成熟的应用向逐步成熟和实用性方面发展,区域直流配电技术具有相当的发展潜力和前途。

综合电力系统是国内外船舶电气领域提出的新型运行方案,是未来发展的趋势,其关键技术之一即是采用直流区域配电技术代替目前使用的交流径向式配电系统。作为提高船舶电力系统生命力和电能品质的重要途径,直流区域配电技术是一个崭新的课题,也是近年来国际上研究的前沿热点领域。

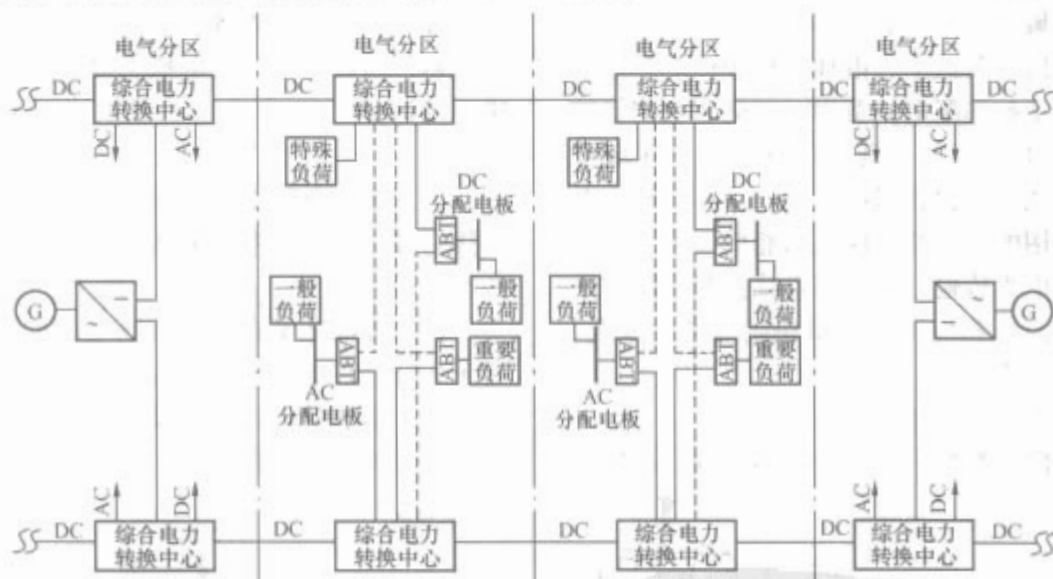


图 4.1-28 船舶直流区域配电系统

6 船舶电力网络的重构与故障恢复

6.1 船舶电力系统网络重构的概念

船舶电力系统网络重构的概念来自陆地电力系统,又称作配电网重构或配电网组态,是指在满足电力系统过电流、过电压、开关操作次数等约束条件下,通过调整网络中分段开关和联络开关的组合状态改变网络结构,以达到降低网损、消除过载、平衡负载分配以及提高电压质量和供电可靠性的目的。为了提高船舶电力系统的供电连续性和可靠性,船舶电力系统网络重构还应包括在系统故障后,通过及时调整网络结构,快速恢复停电负载的供电,最大限度地保证各级负载的供电连续性,即故障恢复。

因此,船舶电力系统网络重构应含有两层含义,即系统优化运行和故障恢复,其完整的概念可以表述为:在满足船舶电力系统过电流、过电压、网络运行结构限制及开关操作次数等约束条件下,通过调整网络中分段开关和联络开关的组合状态改变网络结构,使系统在正常运行时处于最优的稳定运行状态,并在系统故障后,快速恢复停电负载的供电,最大限度地保证各级负载的供电连续性。

随着现代船舶用电设备的不断增多,在网机组总容量的显著上升,运行工况的增加以及网络结构形式的日益复杂和多变,传统的采用手动或半自动方式对船舶电力系统进行日常调度和维护已不能适应系统发展的要求。电力系统网络重构作为船舶电力系统供配电自动化管理的一项重要功能,能有效地提高系统运行效率,增强系统安全运行能力及可靠

性, 保证系统故障后的供电连续性。

6.2 船舶电力系统网络重构方法

电力系统网络重构问题可以抽象成一个多目标、多约束、多时段的非线性规划问题, 其优化结果输出为一个使所求目标函数达到最优的网络组态及各主要设备的运行状态。其数学模型可以描述如下。

$$\begin{aligned} \text{目标函数} \quad & \max \sum k_i(t) \cdot f_i(K, X) \\ \text{约束条件} \quad & g(K, X) = 0 \\ & H(K, X) \leq 0 \\ & f_i \in F, K \in T(t) \end{aligned}$$

式中: X 为状态变量, 包括有功无功功率 P 、 Q , 电压、电流 U 、 I 等运行参数; K 为控制变量, 即开关状态变量, 决定着网络的结构; T 为所求解问题的解空间, 即可操作的开关变量集合, 其与时间 t 有关, 即与当前网络状态有关; F 为重构目标函数集合, f_i 为属于集合 F 的子目标函数, k_i 为对应于 f_i 的权值系数, 与时间 t 有关, 即与当前系统运行需求有关。

网络重构问题的求解主要需要解决两方面的问题: 一是网络重构的目的是什么, 二是怎样得到最优的重构方案。具体的说就是根据电力系统网络的当前运行状态和实际需要确立网络重构目标模型以及寻求能够快速求解满足约束条件的最优重构方案的网络重构算法。

6.2.1 网络重构目标模型

船舶电力系统网络重构含有系统优化运行和故障恢复两层含义, 其重构目标自然也对应分为两个方面。在优化系统运行方面, 衡量重构方案好坏的主要因素有: 系统网损, 负载平衡程度, 网络运行的稳定性和可靠性等。由于船舶电力系统输电线路比较短, 大多为直接供电, 系统在线路上的总体损耗并不大, 因此在重构目标建模中常常将其作为次要因素来考虑。船舶电力系统为—有限电网, 一些大型动态负载与发电机组容量处于同一量级, 负载分配的不均匀极有可能造成机组过载导致故障, 影响系统供电的可靠性。而不合理的网络运行结构则会影响到网机组运行的稳定性以及系统克服故障持续供电的能力, 因此, 负载平衡程度以及网络运行的稳定性和可靠性是船舶电力系统在考虑优化系统运行时考虑的主要因素。

船舶电力系统更为关心的问题是提高系统故障后持续供电的能力。网络重构目标在故障恢复方面的建模较为复杂。一般意义上的故障恢复目标是在最短时间内尽量多地恢复负载的供电, 并保证重构后系统运行稳定性和可靠性, 相应的评价指标有: 恢复负载供电的容量, 开关的操作代价, 重构后的系统容量裕度等。但由于船舶电力系统容量有限, 在系统因故障而出现能量缺失时, 很难做到全部停电负载的供电恢复, 因此需要确定各类负载的优先等级, 保证重要负载的优先供电。而船舶在不同的工况和故障状态下对各类负载的需求是不同的, 因此负载的优先等级会随着船舶的实际需求而不断变化。理想的故障恢复目标模型应能够根据船舶实际需求进行实时调整。

船舶电力系统网络重构作为一个复杂的多目标、多时段的非线性规划问题, 其重构目标模型很难用一个统一的数学公式来描述。合理的做法是针对船舶不同的运行状态和航行、作战需求建立相应的重构目标模型, 在求解重构方案时, 根据实际情况确立各类重构目标的主次, 优先考虑主要的重构目标, 并适当兼顾次要的重构目标。

6.2.2 网络重构算法

对于船舶电力系统网络重构属于非线性规划问题, 不能

用一般的线性规划方法求解。其非线性特征表现在两个方面: ①网络重构问题的求解结果为一个使所求目标函数达到最优的网络组态及各主要设备的运行状态, 这一结果是非线性的; ②约束条件中也含有不少非线性约束条件。由于船舶电力系统的结构与运行的特殊性, 约束条件不仅包括发电机、馈线容量, 开关操作次数的限制, 一些影响电网运行安全的结构形式也要受到限制, 如并联运行机组台数就要受到系统断路器分断能力的限制。特别在系统故障后, 一些设备可能损坏严重, 短时间内无法修复, 对这些设备的操作就要受到限制, 这些限制也必须在约束条件中给予考虑。这些反映系统结构限制的约束条件也是非线性的。由于存在诸多非线性因素, 极少有采用线性规划方法求解网络重构问题的例子。

目前网络重构算法可主要分为启发式搜索算法和智能方法两大类。典型的启发式搜索方法有: 最优流模式法, 支路交换法, 图论方法等。智能方法又可以分为智能搜索算法和人工智能方法两类。智能搜索算法包括: 遗传算法, 模拟退火算法, 禁忌搜索算法等, 人工智能算法有: 人工神经网络、专家系统、Petri 网络法等。

启发式搜索方法一般将电力系统简化为由简单元件(电阻, 开关等)组成的电网络, 采用启发式规则搜索最优解或次优解, 具有算法流程简单, 计算量较小的特点, 但其缺点也较明显: ①只能针对较为简单的重构指标(如网损等)进行求解; ②网络模型过于简单, 不够精确; ③搜索结果受初始状态影响较大, 往往只能得到次优解; ④不能考虑到网络结构约束条件。启发式搜索算法比较适合在系统针对某项指标进行重构优化时使用。智能搜索算法可以解决较为复杂的网络重构目标模型, 并考虑到网络结构约束等复杂约束条件。算法引入随机搜索机制, 可以有效地避免陷入局部最优, 往往能够得到全局最优解, 其缺点是算法流程较为复杂, 计算量较大, 重构目标不易根据需求及时调整。人工智能方法模拟人的思考方式, 在分析系统实际的情况后, 利用原有知识和经验做出决策, 给出满足重构要求的重构方案, 人工智能方法可以综合考虑各种因素, 适于分析复杂的大型系统, 并能根据实际需求及时调整, 缺点是当系统规模庞大而且复杂时, 对其知识进行完备的描述和归纳将变得非常困难, 且此类方法无法保证获得全局最优解。

目前常用的各类算法都有其优缺点和适用范围。近年来, 出现了将多种算法相结合的趋势, 如遗传算法与专家系统相结合, 遗传算法与模拟退火法相结合, 启发式搜索与模糊推理相结合等。此类混合算法有助于克服单个算法自身的缺点, 求取更好的恢复策略, 缩短形成方案的时间, 是未来重构算法的发展方向。

6.3 网络重构相关技术

船舶电力系统网络重构并不是一个单纯的数学问题, 要想在实际系统中实现网络重构功能还需要精确、庞大的数据采集系统, 高速、可靠的信息传递系统, 以及大量可以集中控制的联络性开关。与船舶电力系统故障重构密切相关的关键技术还包括:

(1) 适合于各类船舶电力系统的通用网络拓扑结构表达方式及实用的在线潮流计算方法。目前船舶电力系统的网络结构形式有简单树形结构, 环形结构, 梯形结构及网形结构, 需要一种统一的节点和支路定义和编号方式, 以便于潮流计算和识别故障元件。潮流计算是影响重构技术实时性的关键性因素, 因此要选择一种针对船舶电力系统既快速又准

确的潮流计算方法。

(2) 具有一定容错能力的故障定位与诊断及故障后网络拓扑跟踪方法。迅速、准确、有效的故障定位与诊断是系统故障重构能否成功的前提条件。由于船舶电力系统所处环境恶劣,电磁干扰大,各检测元件会因为老化、干扰等原因而出现误检,从而影响网络重构的实现。为提高故障检测的可靠性,系统故障定位与检测方法必须具有一定的容错能

力。用于故障定位和检测的电力系统特征信号的定义和提取也是值得考虑的问题。

(3) 能够实时自动对全网结构进行统一调整的自动控制技术。故障重构的初期往往会伴随一系列动态问题,如谐波、过电压、过电流问题等严重时会导致保护系统误动作,造成二次故障,因此,控制系统需要认真分析和研究重构的时机和开关操作时机和顺序,保证重构方案安全实施。



第2章 船舶电力系统保护

1 船舶电力系统保护的基本要求

1.1 保护的必要性和一般方法

随着船舶电气化和自动化程度的日益提高,对船舶电力系统的可靠性和生命力提出了更高的要求。船舶电力系统在实际运行中,由于外力引起的破损或操作不当以及设备本身的问题,可能使系统出现各种故障或非正常运行状态,它们会使船舶电力系统的安全可靠运行受到威胁,严重时会导致设备的损坏或使整个电力系统的供电中断,影响船舶的功能操作及航行安全。为此,船舶电力系统必须设置可靠的保护装置,即所谓的断电保护装置。有了保护装置,系统一旦发生故障,保护装置可迅速断开故障线路,不使故障蔓延扩大,保证非故障线路能正常连续供电;或者发出声光报警信号,使值班人员及时采取适当措施,排除故障。

保护装置由各种保护电器(常用的如各种形式的断路器、熔断器、继电器等)构成,通常设置在电源侧出口处。当装置检测到被保护电路的参数超过整定值时,装置的执行机构动作(瞬时或延时),使故障电路开断。

随着船舶电力系统容量的增大,对断路器和开关设备的性能提出了更严格的要求,为配合断路器和开关设备的工作,各种类型的限流器技术也开始用于船舶电力系统中,为保证稳定、安全的输送大容量和高质量的电能提供了一种新的保护手段。

1.2 对保护的原则要求

对船舶电力系统供电的基本要求是:①要保证安全可靠地供电;②要保证电能质量;③要考虑经济运行。船舶电力系统中各种继电保护装置,主要就是为了实现第一项基本要求而设置的。

船舶电力系统在运行中,可能出现各种不正常运行和故障情况。船舶电力系统的不正常运行情况主要有过载、欠电压、过电压、欠频、过频、逆功率以及三相三线制中性点绝缘系统发生单相接地等。船舶电力系统中最常见最严重的故障就是各种形式的短路,如图4.2-1所示,可有三相短路 $D^{(3)}$ 、两相短路 $D^{(2)}$ 、两相接地短路 $D^{(1,1)}$ 、三相四线制系统单相接地短路 $D^{(1)}$ 。另外,还可能发生电机或变压器绕组匝间短路和线路的断线等故障。

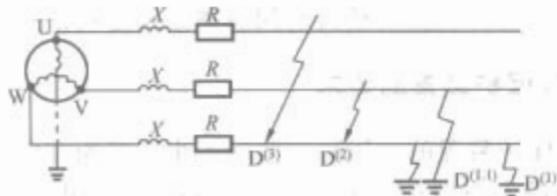


图 4.2-1 短路故障示意图

上述不正常运行情况和故障发生后,往往会引起严重后果,例如:当发生短路故障时,负载被短接,短路电流很大,故将产生很大的电动力和热效应,并使电压大大下降,这将可能造成重要设备损坏或中断供电,从而带来极大的损

失。严重的短路故障若不及时切除,有可能使并联运行的发电机失步,破坏并联运行稳定性,使电站解列,扩大成为系统性事故,以致使整个电力系统失电,影响船舶安全航行。

由于上述情况和原因,在船舶电力系统的设计和运行中,都要采取措施,尽量避免不正常运行和短路情况的发生。但实践说明,由于各种原因,仍不免会发生不正常运行和短路故障。因此,还要有办法来限制不正常运行和短路的破坏作用,其中最有效的办法之一,就是在船舶电力系统的主要电气设备上,装设继电保护装置,以自动迅速地切除故障。因此,继电保护的 tasks 可归纳为如下几点。

(1) 当电气设备发生故障或足以造成故障的发生时,继电保护装置将自动地、迅速地并有选择性地切除发生故障的电气设备,以保护设备,并保证非故障部分正常安全运行。

(2) 当电气设备发生不正常运行情况时,继电保护装置应自动发出报警信号,使值班人员及时进行处理,以防事故发生和扩大,或自动切除不正常运行的电气设备。

(3) 配合自动控制装置,自动消除或减少事故发生。

根据船舶电力系统继电保护担负的基本任务和作用,对它提出的原则要求如下。

(1) 防护的完全性。即要保证系统中各种类型的电气设备全都设有所需类型的保护,并且要明确各种保护的覆盖范围,确定被防护部分的界限和每部分上保护方法的组成,以便最大限度地保护所有电气设备及其电路。

(2) 具有选择性。继电保护的选择性是指当电力系统发生故障时,继电保护装置应仅把故障元件切除,使停电范围尽量缩小,从而保证电力系统中其他非故障部分仍然能够继续安全地运行。如图4.2-2所示,当在 D_1 点发生短路时,应仅是离故障点 D_1 最近的 K_3 开关中的保护装置动作,将 K_3 自动断开,这时, K_2 和 K_1 开关中的保护装置都不应动作,该开关也不应断开,这就叫做保护具有选择性。若保护装置无选择性动作,就要扩大停电范围,甚至引起全船停电,可能出更大的事故。

在选择性保护中,若前一级保护装置拒绝动作,则后一级保护装置应动作。如图4.2-2中所示,当 D_1 点短路时,若 K_3 开关由于某种原因没有断开,故障不能切除,则 K_2 开关中的保护装置应动作,将 K_2 开关自动断开。显然,这种情况是部分地失掉了选择性,扩大了停电范围。在这种情况下,称后一级保护是前一级保护的后备保护。由于继电保护装置或开关拒绝动作的现象还是可能发生的,因此后备保护是必要的。否则,故障部分将无法切除或使事故更加扩大。

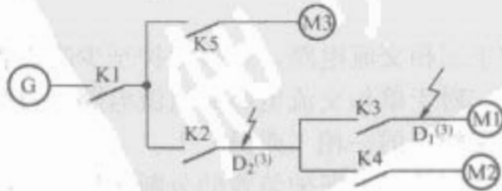


图 4.2-2 保护选择性示意图

对电力系统继电保护装置选择性的要求,可用整定保护电器的动作时限或动作值来达到。

(3) 具有速动性。继电保护的速动性就是保护装置动作时限应力求短。迅速切除故障可减轻被保护设备的损坏程度;防止故障蔓延,缩小破坏范围;减少对非故障部分的影响,保证其正常安全运行。要求快速切除短路故障的理由主要有以下两方面。

1) 热效应方面:通过电气元件的短路电流产生的热量 Q_r 与短路电流 I_{dt} 的二次方和时间 t 成正比,即

$$Q_r = KI_{dt}^2 t$$

式中: K 为比例系数。

由此可见,切除得快,产生的热量小,设备不易烧坏。

2) 对负荷的影响方面:对异步电动机的影响最明显,因异步电动机的转矩 M 是和电压的二次方成正比的,即

$$M = KU^2$$

式中: K 为比例常数。

由上式可见,若电压 U 下降较大,转矩 M 下降大,会使异步电动机停止运转。若短路故障很快切除,非故障部分的电压可迅速恢复,因为异步电动机有一定的惯性,所以可使非故障部分的异步电动机仍然正常工作。若切除得慢,非故障部分的异步电动机也都要停下来,其中包括重要负荷,这是很不利的。

(4) 具有灵敏性。继电保护装置的灵敏性是指对于其保护范围内的故障或不正常工作状态的反应能力。就是说,在保护范围内,不管运行情况、短路性质和位置如何,对属于自己保护之内的故障,都应反应灵敏。灵敏性愈高,故障发觉和切除得就愈早,从而对系统的影响和设备的破坏就愈小。保护装置的灵敏性,用灵敏度来表示,在以后具体保护中说明。

(5) 具有可靠性。继电保护装置的可靠性是指装置本身要能可靠地工作,对它保护范围之内的故障,不应拒绝动作;在正常运行或不属于它保护的故障时,不应误动作。否则,它本身就可能成为产生和扩大事故的根源。因此,保证保护装置的可靠性是很重要的。

保护装置的可靠性主要取决于:保护方式的选择;装置本身的质量(包括必要的分断容量和热容量);整定计算和调试;安装、维护和检修质量等。

从对保护装置的上述基本要求中可以看出,这四个方面是互相联系、互相制约的。例如:若速动性很高,则选择性就要差些,反之亦是。若可靠性很高,则灵敏性就要差些,反之亦是。对于具体问题需结合实际,具体分析和解决,例如,对于过载保护,主要要考虑其可靠性,并不要求它的速动性;而对于短路保护,则要尽量考虑它的速动性。

1.3 对保护的具体要求

(1) 对于各种类型的故障,在故障出现到相应保护装置动作的时间段内,故障电流所形成的电动应力和热效应力应不会造成保护装置本身以及有关电气设备和电缆的损坏。

(2) 短路保护应设置在各保护点的每一相(或每一极)上。

(3) 对于三相交流电路,过载保护至少应设置在各保护点的两相上。对于单相交流电路和直流电路,过载保护至少应设置在各保护点的一相(或极)上。

(4) 在任何情况下保护装置的分断作用不应破坏电力系统的工作稳定性。

(5) 在进行电力系统的保护设计时应考虑到在故障排除

后能方便、迅速地对断电电路恢复供电。

(6) 电力系统的保护设计和性能应与整个电力系统的自动化要求相适应。

(7) 电力系统的保护设计应与配电系统的结构设计充分协调,以使各级配电系统的保护要求能够通过简单、合理和可行的保护方案来实现。

(8) 在选择和整定保护装置时,应注意系统保护和设备保护之间的协调和配合,还应注意与有关用电设备的起动器、接触器和控制开关之间的协调和配合。短路保护装置正常分断后,各有关控制电器应满足下列要求。

1) 起动器过载继电器的电流-时间特性不应发生永久性改变,即应能继续保持或满足规定的动作特性要求。

2) 接触器除允许更换触头外,应无其他损坏,接触器的带电极与基座之间不应有飞弧或持续燃弧,并能在闭合状态下通过两倍额定绝缘电压的工频耐电压试验。

3) 控制开关应能在规定的时间内承受其负载侧的短路电流的冲击。

(9) 当电动机正常起动、变压器正常接入或把它们从一个电站转接到另一个电站时,配电系统中的有关保护装置不应发生误动作。

(10) 在上、下级保护装置均为断路器的配电系统中,若断路器设有长、短延时脱扣器,则在同一故障电流的作用下,下级断路器的全分断时间(包括延时和固有分断时间)应小于上级断路器的可返回时间。

(11) 在上、下级保护装置分别为断路器和熔断器的配电系统中,若断路器设有长延时脱扣器,则在同一过载电流的作用下,熔断器的熔断时间应短于断路器长延时脱扣器特性的可返回时间;若断路器还设有短延时脱扣器,则在同一短路电流的作用下,熔断器的熔断时间应至少比断路器短延时脱扣的延时时间短 0.1s。

(12) 在上、下级保护装置均为熔断器的配电系统中,下级熔断器的弧前 I^2t 特性的最大值应小于上级熔断器弧前 I^2t 特性的最小值。

(13) 在上、下级保护装置分别为熔断器和断路器的配电系统中,若断路器设有长延时脱扣器,则在同一过载电流的作用下,断路器的全分断时间(包括延时和固有分断时间)应短于由熔断器的弧前 I^2t 特性决定的熔断时间;若断路器还设有瞬时脱扣器,则在可能出现的同一短路电流的作用下,断路器的分断时间应至少比熔断器的熔断时间短 70ms。

(14) 若设有电网的欠电压和(或)过电压保护,则应能区分和避开由于负载的正常投入和切除所引起的电网电压的瞬态波动。欠电压保护不应破坏系统在低阻抗故障时选择性保护。

(15) 在能够实现选择性保护的前提下,电力系统中各断路器的短延时脱扣的延时时间应整定得尽可能短。

1.4 选择保护装置的要求

(1) 保护装置的电压额定值应不小于其所在电路的交流线电压的最大有效值(对交流)或最大直流电压值(对直流)。

(2) 保护装置(断路器过电流检测器)的额定电流应不小于可能流经该保护装置的总的最大持续负载电流。

(3) 所有短路保护装置的分断能力应不低于其安装点的最大预期对称短路电流的有效值(对交流)或最大预期短路电流(对直流)。

注：当实际交流短路功率因数小于保护装置额定分断能力所对应的功率因数时，应按 GB 3321—1982 的要求换算出保护装置的实际能力；当实际直流短路时间常数大于保护装置额定分断能力所对应的时间常数时，应按有关产品技术条件换算或确定出保护装置的实际分断能力。

(4) 所有可能接通短路点的断路器的接通能力应不低于其安装点的预期短路电流最大峰值。

(5) 若因客观条件所限难以满足以上 (3) 和 (4) 条的要求时，允许以后备保护作为补救措施，采用后备保护时应满足下列要求：

1) 不能用电力系统的发电机断路器或主汇流排跨接电缆断路器作为配电系统中有关断路器或熔断器的后备保护装置。

2) 后备保护装置应安装在分断能力和 (或) 接通能力不足的原保护装置的电源侧。

3) 后备保护装置应与原保护装置的时间—电流特性应能相互衔接和匹配。

4) 同一保护装置不允许装设两个或两个以上的后备保护装置。

5) 在重要设备的供电电路中，任一保护装置均不得与其他保护装置共用一个后备保护装置。

6) 对首次组合应用的原保护装置和后备保护装置应进行验证试验以确认其适用性。

(6) 若选用断路器来提供保护，则此断路器应能同时分断所在电路的所有绝缘极。

(7) 应尽量选用插入式或抽屉式结构的断路器，以便维修和更换。

(8) 用作过载保护的断路器应具有与其保护对象的过载能力以及系统的选择性要求相适应的 (脱扣时间—过电流) 脱扣特性。

(9) 额定值等于或小于 200A 的熔断器，若具有合适的特性可用作过载保护；额定值大于 200A 的熔断器一般不应用作过载保护。

2 船舶电力系统短路电流计算

下面介绍的关于船舶电力系统短路电流计算是由国家标准 GB 3321—1982《船舶交流电力系统的短路计算》给出的。

由于船舶的尺度是有限的，目前世界上最大的船舶长度仅 200m 左右，这就决定了船舶电力系统的范围，送电与配电电缆的长度一般不会超过船的长度，而且大部分电气设备集中在机舱和生活区。因此，船舶交流系统的短路可近似地看成是交流同步发电机和等效电动机“机端”短路过程，发电机定子周期分量短路电流的变化需要考虑进去，与无限大容量电源系统的短路是不同的。国家标准中短路算法是以 IEC 第 363 号出版物有关短路电流计算部分为基础制定的，它较全面地考虑了短路电流在超瞬变过程中的衰减，考虑了短路回路阻抗对时间常数的影响，比较接近船舶交流电力系统短路的实际过程，因而是一种比较精确的短路电流计算方法。这种计算方法与 IEC 第 363 号出版物规定的计算方法是等效的，不同之处是国标在短路功率因数计算，不同规格发电机并联运行电力系统的短路电流计算以及变压器次级侧的短路电流计算等方面作了补充。

此外，英国“劳氏”(LR) 船级社还提供了一种船舶的交流电力系统短路电流计算的简单方法。其基本指导思想是将船舶电力系统看成是“无限大容量电源”系统，这

种假设下在计算短路电流周期分量时，只考虑起始超瞬变电流而不计及它的衰减，使周期分量的幅值等于定值，从而简化了短路电流的计算，显然，这种假设下计算出的短路电流总会大于实际值，所以是一种偏于保守的简化计算方法。

2.1 名词术语

2.1.1 对称短路电流

突然短路后，短路电路中的方均根电流。如有非周期性分量，应不计算在内。

2.1.2 短路电流非周期性分量

突然短路后，短路电路中电流的一个组成部分，所有基波和谐波均不计算在内。

2.1.3 最大非对称短路电流

突然短路后第一个半周内，短路电路中电流所达到的峰值，其条件是电流的非周期性分量初始值应为最大。

2.1.4 峰值系数

电路中的最大非对称短路电流与对称短路电流之比。

2.1.5 等效发电机

为计算短路电流，将运行中的各台发电机综合成一台等效发电机，该等效发电机馈送的短路电流等效于各台发电机馈送的短路电流之和。

2.1.6 等效电动机

为简化短路电流的计算，将运行中的各台电动机综合成一台等效电动机，该等效电动机馈送的短路电流等效于各台电动机馈送的短路电流之和。

2.1.7 平均等效电动机

为计算短路电流，将运行中的各台电动机看成是台数等于运行中电动机实际台数的相同规格的平均等效电动机，这些平均等效电动机馈送的总短路电流等效于运行中的各台电动机馈送的短路电流之和。其额定功率等于等效电动机额定功率与运行中的电动机台数之比。

2.1.8 大容量电动机

系指船上额定功率与单台发电机额定功率相接近的电动机。

2.1.9 短路功率因数

在短路发生瞬间，整个短路电路中的电阻与阻抗之比。

2.1.10 自动开关短路分断能力换算系数

系指当计算所得的短路功率因数小于自动开关的给定值时，进行短路分断能力换算中所采用的系数。

2.2 计算用符号和代号

本标准采用下列供计算用的符号和代号。其中在序号栏中标有“*”号者为计算中所需原始数据，对于电动机和变压器的有关参数应为 Y 联结或换成 Y 联结的数值。

2.2.1 电压

不用电压符号、名称及单位见表 4.2-1。

表 4.2-1 不同电压符号、名称及单位

序号	符号	名 称	单位
1*	U_N	一次配电系统额定线电压	V
2	V_N	一次配电系统额定相电压	V
3*	U_{NM}	电动机额定线电压	V
4*	U_{N1}	变压器一次额定线电压	V
5*	U_{N2}	变压器二次额定线电压	V
6*	u_K	以百分数表示的变压器短路电压	%
7*	u_R	以百分数表示的变压器短路电压的电阻分量	%
8*	u_X	以百分数表示的变压器短路电压的漏抗分量	%

2.2.2 电流

不同电流符号、名称及单位见表 4.2-2。

表 4.2-2 不同电流符号、名称及单位			
序号	符号	名 称	单位
1	I''_g	发电机超瞬态对称短路电流初始值（空载）	kA
2	I''_{gi}	第 i 台发电机超瞬态对称短路电流初始值（空载）	kA
3	I''_G	等效发电机超瞬态对称短路电流初始值（空载）	kA
4	I'_g	发电机瞬态对称短路电流初始值（空载）	kA
5	I'_{gi}	第 i 台发电机瞬态对称短路电流初始值（空载）	kA
6	I'_G	等效发电机瞬态对称短路电流初始值（空载）	kA
7	I_{acog}	短路发生后第一个半周时发电机对称短路电流（空载）	kA
8	I_{acgi}	短路发生后第一个半周时第 i 台发电机对称短路电流（空载）	kA
9	I_{acG}	短路发生后第一个半周时等效发电机对称短路电流（空载）	kA
10	I_{acg}	短路发生后第一个半周时发电机对称短路电流（额定负载）	kA
11	I_{acgi}	短路发生后第一个半周时第 i 台发电机对称短路电流（额定负载）	kA
12	I_{acG}	短路发生后第一个半周时等效发电机对称短路电流（额定负载）	kA
13	I_{dsg}	短路发生后第一个半周时发电机的短路电流非周期分量	kA
14	I_{dsgi}	短路发生后第一个半周时第 i 台发电机的短路电流非周期分量	kA
15	I_{dsG}	短路发生后第一个半周时等效发电机的短路电流非周期分量	kA
16	I_{pg}	发电机最大非对称短路电流	kA
17	I_{pgi}	第 i 台发电机最大非对称短路电流	kA
18	I_{pG}	等效发电机最大非对称短路电流	kA
19	I_{acM}	短路发生后第一个半周时等效电动机对称短路电流	kA
20	I_{dsM}	短路发生后第一个半周时等效电动机的短路电流非周期分量	kA
21	I_{pM}	等效电动机最大非对称短路电流	kA
22	I_{sc}	短路发生后第一个半周时短路点的对称短路电流	kA
23	I_p	短路点的最大非对称短路电流	kA
24	I_{sc2}	短路发生后第一个半周时变压器二次侧的对称短路电流	kA
25	I_{p2}	变压器二次侧的最大非对称短路电流	kA
26*	I_{Ng}	发电机额定电流	kA
27	I_{NM}	等效电动机额定电流	kA
28*	I_{Nm}	平均等效电动机额定电流	kA
29	I_{csN}	自动开关额定短路分断能力	kA
30	I_{cn}	换算后的自动开关短路分断能力	kA

2.2.3 电抗、电阻和阻抗

不同电抗、电阻和阻抗的符号、名称及单位见表 4.2-3。

表 4.2-3 不同电抗、电阻和阻抗的符号、名称及单位			
序号	符号	名 称	单位
1	X''_d	发电机直轴超瞬态电抗	mΩ
2*	x''_d	发电机直轴超瞬态电抗标么值	
3	X''_D	等效发电机直轴超瞬态电抗	mΩ
4	X'_d	发电机直轴瞬态电抗	mΩ
5*	x'_d	发电机直轴瞬态电抗标么值	
6	X'_D	等效发电机直轴瞬态电抗	mΩ
7	X_d	发电机直轴同步电抗	mΩ

续表

序号	符号	名 称	单位
8*	x_d	发电机直轴同步电抗标么值	
9	X_D	等效发电机直轴同步电抗	mΩ
10*	R_d	发电机电枢电阻	mΩ
11	r_d	发电机电枢电阻标么值	
12	R_A	等效发电机电枢电阻	mΩ
13*	R_s	平均等效电动机定子电阻	mΩ
14	r_s	平均等效电动机定子电阻标么值	
15	R_s	等效电动机定子电阻	mΩ
16	r_s	等效电动机定子电阻标么值	
17	R_r	平均等效电动机转子电阻	mΩ
18	r_r	平均等效电动机转子电阻标么值	
19*	X'_m	平均等效电动机瞬态电抗	mΩ
20	x'_m	平均等效电动机瞬态电抗标么值	
21	X'_M	等效电动机瞬态电抗	mΩ
22	x'_M	等效电动机瞬态电抗标么值	
23	Z'_M	等效电动机瞬态阻抗	mΩ
24	X_T	折合至一次侧的变压器电抗	mΩ
25*	x_T	折合至一次侧的变压器电抗标么值	
26	R_T	折合至一次侧的变压器电阻	mΩ
27*	r_T	折合至一次侧的变压器电阻标么值	
28	Z_T	折合至一次侧的变压器阻抗	mΩ
29	X_{gh}	自发电机至主汇流排之间的线路电抗	mΩ
30	R_{gh}	自发电机至主汇流排之间的线路电阻	mΩ
31	X''_g	在主汇流排处呈现的单台发电机合成超瞬态电抗	mΩ
32	X''_{gi}	第 i 台发电机在主汇流排处呈现的合成超瞬态电抗	mΩ
33	X'_g	在主汇流排处呈现的单台发电机合成瞬态电抗	mΩ
34	R_g	在主汇流排处呈现的单台发电机合成电阻	mΩ
35	R_{gi}	第 i 台发电机在主汇流排处呈现的合成电阻	mΩ
36	X_e	主汇流排至短路点之间的线路电抗	mΩ
37	R_e	主汇流排至短路点之间的线路电阻	mΩ
38	Z_e	主汇流排至短路点之间的线路阻抗	mΩ
39	X_{e1}	主汇流排至变压器一次端之间的线路电抗	mΩ
40	R_{e1}	主汇流排至变压器一次端之间的线路电阻	mΩ
41	R_{e2}	变压器二次端至短路点之间的线路电阻	mΩ
42	X_{e2}	变压器二次端至短路点之间的线路电抗	mΩ
43	X''_{eG}	在短路点处呈现的等效发电机合成超瞬态电抗	mΩ
44	Z'_{eG}	在短路点处呈现的等效发电机合成瞬态阻抗	mΩ
45	Z'_{eM}	在短路点处呈现的等效电动机合成瞬态阻抗	mΩ
46	X_{kb}	在主汇流排处呈现的短路电路电源侧合成电抗	mΩ
47	R_{kb}	在主汇流排处呈现的短路电路电源侧合成电阻	mΩ
48	Z_{kb}	在主汇流排处呈现的短路电路电源侧合成阻抗	mΩ
49	X_k	在短路点处呈现的短路电路电源侧总电抗	mΩ
50	R_k	在短路点处呈现的短路电路电源侧总电阻	mΩ

续表

序号	符号	名 称	单位
51	Z_k	在短路点处呈现的短路电路电源侧总阻抗	$m\Omega$
52*	x	单位长度电缆电抗	$m\Omega/m$
53*	r	单位长度电缆电阻	$m\Omega/m$
54	R	电缆电阻的统称	$m\Omega$
55	X	电缆电抗的统称	$m\Omega$

2.2.4 时间常数

不同时间常数的符号、名称及单位见表 4.2-4。

表 4.2-4 不同时间常数的符号、名称及单位

序号	符号	名 称	单位
1*	T_d''	发电机直轴超瞬态短路时间常数	ms
2	T_D''	等效发电机直轴超瞬态短路时间常数	ms
3*	T_a	发电机非周期时间常数	ms
4	T_A	等效发电机非周期时间常数	ms
5*	T_d'	发电机直轴瞬态短路时间常数	ms
6*	T_{actm}'	平均等效电动机瞬态短路时间常数	ms
7	T_{acM}'	等效电动机瞬态短路时间常数	ms
8*	T_{dcM}	平均等效电动机非周期时间常数	ms
9	T_{dcM}	等效电动机非周期时间常数	ms
10	T_{dcMg}	计及发电机至主汇流排之间线路阻抗影响的发电机非周期时间常数	ms
11	T_{eG}''	计及线路阻抗影响的等效发电机直轴超瞬态短路时间常数	ms
12	T_{dcG}	计及线路阻抗影响的等效发电机非周期时间常数	ms
13	T_{dcM}	计及线路阻抗影响的等效电动机非周期时间常数	ms

2.2.5 功率

不同功率的符号、名称及单位见表 4.2-5。

表 4.2-5 不同功率的符号、名称及单位

序号	符号	名 称	单位
1*	S_{Ng}	发电机额定视在功率	kVA
2*	P_{Ng}	发电机额定功率	kW
3*	$\sum P_{Ng}$	运行中发电机（不包括短时转移负载的发电机）总额定功率	kW
4*	$\sum P_{Nm}$	运行中电动机额定功率的总和（按电力负荷计算书算得）	kW
5*	P_{NM}	等效电动机额定功率	kW
6*	P_{Nm}	平均等效电动机额定功率	kW
7*	S_{NT}	变压器额定视在功率	kVA
8*	P_k	变压器短路损耗	kW

2.2.6 其他

其他参数的符号、名称及单位见表 4.2-6。

表 4.2-6 其他参数的符号、名称及单位

序号	符号	名 称	单位
1	$\cos\varphi_k$	短路电路的短路功率因数	—
2	$\cos\varphi_{kN}$	自动开关试验短路功率因数给定值	—
3*	$\cos\varphi_M$	等效电动机额定功率因数	—
4*	η_M	等效电动机效率	—
5	e	自然对数的底数	—
6*	f	频率	Hz

续表

序号	符号	名 称	单位
7	T	周期	ms
8*	q	运行中的发电机、电动机或变压器台数	—
9*	q_1	运行中的一种规格发电机台数	—
10*	q_2	运行中的另一种规格发电机台数	—
11*	l	电缆长度	m
12*	a	并联电缆根数	—
13*	s	电缆截面积	mm ²
14	n	对应于自动开关试验短路功率因数的峰值系数	—
15	n'	对应于短路电路短路功率因数的峰值系数	—
16	C	自动开关短路分断能力换算系数	—
17	K	电动机负载同时系数	—
18*	A_i	发电机自动开关电源端处的短路点代号	—
19*	B_i	邻近主汇流排处的短路点代号	—
20*	C_i	主汇流排处一次配电系统馈电线处的短路点代号	—
21*	D_i	变压器二次侧的短路点代号	—
22	G_i	第 i 台发电机的代号	—
23	M	电动机的代号	—
24	T_i	第 i 台电力变压器的代号	—
25	F	熔断器的代号	—

2.3 通则

(1) 本标准仅提供计算船舶交流电力系统发生三相短路后第一个半周时的短路电流，以及短路发生瞬间的短路功率因数的近似计算方法。对于不对称短路，则可按下列原则处理。

- 1) 二相短路电流可取为三相短路电流值的 0.866 倍。
- 2) 中性点接地的交流电力系统中，单相短路电流可近似认为等于三相短路电流值。
- 发电机输出端短路的稳态短路电流值，可向制造厂索取。

(2) 本计算方法的计算程序
先分别计算发电机和电动机各自馈送的短路电流，然后将两者算术相加而求得所需短路电流。

(3) 在计算最大短路电流时，应计及对应于船舶电站最大负载工况。

- 1) 所有可能并联运行的发电机（包括短时转移负载的发电机）所馈送的短路电流。
- 2) 所有运行中的电动机所馈送的短路电流。

(4) 为电力系统选择性保护的设计和整定需要，若需计算最小短路电流时，则需计算最小运行工况下，单台发电机所馈送的二相短路电流值。

(5) 当近主汇流排处短路时的短路功率因数低于所选用的自动开关的给定值时，则该自动开关的短路分断能力应根据产品制造厂提供的换算系数进行换算。

(6) 本标准中关于短路电路阻抗的计算，仅计及发电机、电动机、变压器以及电缆的阻抗（有效数字不少于 3 位），忽略如汇流排、电流互感器等元件的阻抗。也不计及连接点的接触电阻以及短路故障本身的阻抗。

2.4 发电机馈送的短路电流

2.4.1 发电机的对称短路电流

$$I''_g = \frac{U_N}{\sqrt{R_s^2 + X_d'^2}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-1)$$

$$I'_g = \frac{U_N}{\sqrt{R_s^2 + X_d'^2}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-2)$$

$$I_{acg} = (I''_g - I'_g) e^{-T/2T_d'} + I'_g \quad (\text{kA}) \quad (4.2-3)$$

$$I_{acg} = 1.1 I_{acg} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-4)$$

2.4.2 发电机的短路电流非周期性分量

$$I_{dcg} = \sqrt{2} I''_g e^{-T/2T_d'} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-5)$$

2.4.3 发电机的最大非对称短路电流

$$I_{pg} = \sqrt{2} I_{acg} + I_{dcg} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-6)$$

2.4.4 无阻尼绕组发电机短路电流

对于无阻尼绕组发电机,其短路电流计算乃可用式(4.2-1)~式(4.2-3),只是用 X'_d 、 X_d 和 T'_d 取代 X''_d 、 X'_d 和 T''_d 即可。

2.5 电动机馈送的短路电流

2.5.1 概述

对运行中电动机群所馈送的短路电流采用等效电动机方法计算,即将所有运行中电动机综合成一台直接接至主汇流排(忽略线路阻抗)的等效电动机,等效电动机额定功率等于所有运行中的电动机额定功率的总和。

2.5.1.1 等效电动机额定功率、运行中电动机台数和平均等效电动机额定功率的求取

可按船舶的电力负荷计算书进行计算,但其中的等效电动机额定功率亦可取为实际运行中发电机总额定功率的60%。

2.5.1.2 等效电动机各项参数的求取

若由电动机的参数资料查得平均等效电动机的各项参数为: X'_m 、 R_s 、 T'_{acm} 和 T_{dcm} ,则等效电动机相应的各项参数分别为

$$X'_M = \frac{X'_m}{q} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-7)$$

$$R_s = \frac{R_s}{q} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-8)$$

$$|Z'_M| = \sqrt{R_s^2 + X_M'^2} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-9)$$

$$T'_{acM} = T'_{acm} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-10)$$

$$T_{dcM} = T_{dcm} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-11)$$

在缺乏确切电动机参数时,等效电动机参数也可按下列规定求取。

(1) 当运行中发电机总额定功率 ΣP_{Ng} 等于或大于500kW时

$$x'_M = 0.17$$

$$r_s = 0.03$$

$$T'_{acM} = 13.4\text{ms}$$

$$T_{dcM} = 17.6\text{ms}$$

(2) 当运行中发电机总额定功率 ΣP_{Ng} 小于500kW时

$$x'_M = 0.16$$

$$r_s = 0.05$$

$$T'_{acM} = 11.3\text{ms}$$

$$T_{dcM} = 11\text{ms}$$

2.5.2 等效电动机短路电流的计算

$$I_{acM} = \frac{U_N}{|Z'_M|} e^{-T/2T'_{acM}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-12)$$

$$I_{dcM} = \frac{\sqrt{2}U_N}{|Z'_M|} e^{-T/2T_{dcM}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-13)$$

$$I_{pM} = \sqrt{2} I_{acM} + I_{dcM} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-14)$$

2.6 在邻近主汇流排处短路时短路电流的计算

2.6.1 发电机馈送的短路电流

当计及发电机端至主汇流排之间的线路阻抗时,可得

$$X''_g = X''_d + X_{gb} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-15)$$

$$X'_g = X'_d + X_{gb} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-16)$$

$$R_g = R_s + R_{gb} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-17)$$

$$I''_g = \frac{U_N}{\sqrt{R_g^2 + X_g''^2}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-18)$$

$$I'_g = \frac{U_N}{\sqrt{R_g^2 + X_g'^2}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-19)$$

$$I_{acg} = (I''_g - I'_g) e^{-T/2T_d'} + I'_g \quad (\text{kA}) \quad (4.2-20)$$

$$I_{acg} = 1.1 I_{acg} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-21)$$

$$I_{dcg} = \sqrt{2} I''_g e^{-T/2T_{dcg}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-22)$$

$$I_{dcg} = \frac{T_d + (1000 X_{gb} / 2\pi f R_s)}{1 + (R_{gb} / R_s)} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-23)$$

$$I_{pg} = \sqrt{2} I_{acg} + I_{dcg} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-24)$$

2.6.2 电动机馈送的短路电流

由于忽略了等效电动机至主汇流排之间的线路阻抗,因此该项短路电流可按上述“5 电动机馈送的短路电流”的规定进行计算。此外,当等效电动机额定电流为 I_{NM} 时,则短路电流可近似地取为

$$I_{acM} = 4 I_{NM} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-25)$$

$$I_{pM} = 8 I_{NM} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-26)$$

$$I_{NM} = \frac{\Delta P_{NM}}{\sqrt{3} U_{NM} \eta_M \cos \varphi_M} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-27)$$

$$\eta_M \cos \varphi_M = 0.76$$

2.6.3 短路点的短路电流

当有等效电动机和 q 台发电机向短路点馈送短路电流时,则流向短路点的短路电流为

$$I_{ac} = \sum_{i=1}^q I_{acg_i} + I_{acM} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (\text{kA}) \quad (4.2-28)$$

$$I_p = \sum_{i=1}^q I_{pg_i} + I_{pM} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (\text{kA}) \quad (4.2-29)$$

2.7 在主汇流排外馈电线处短路时短路电流的计算

2.7.1 等效发电机及其参数的求取

设有 q 台发电机并联运行,则应将这些发电机在主汇流排处综合成一台等效发电机,并按下列步骤求取各项参数。

2.7.1.1 q 台相同规格发电机并联运行

$$X''_D = \frac{X''_g}{q} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-30)$$

$$X'_D = \frac{X'_g}{q} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-31)$$

$$R_A = \frac{R_g}{q} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-32)$$

X''_g 、 X'_g 、 R_g 分别由式(4.2-15)~式(4.2-17)计算而得。

2.7.1.2 q 台不同规格发电机并联运行

(1) 按本章2.6.1规定分别计算各台发电机的 I''_g 、 I'_g 、 I_{acg} 和 I_{dcg} 。

(2) 计算等效发电机各项相应的短路电流

$$I''_G = \sum_{i=1}^q I''_{q_i} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (\text{kA}) \quad (4.2-33)$$

$$I'_G = \sum_{i=1}^q I'_{q_i} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (\text{kA}) \quad (4.2-34)$$

$$I_{\text{acc}G} = \sum_{i=1}^q I_{\text{acc}q_i} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (\text{kA}) \quad (4.2-35)$$

$$I_{\text{dc}G} = \sum_{i=1}^q I_{\text{dc}q_i} \quad (i=1,2,\dots,q) \quad (\text{kA}) \quad (4.2-36)$$

(3) 计算等效发电机的各项参数,计有

$$X''_D = \frac{U_N}{I''_G} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-37)$$

$$X'_D = \frac{U_N}{I'_G} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-38)$$

$$T_A = \frac{1000}{2f \ln(\sqrt{2}I''_G / I_{\text{dc}G})} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-39)$$

$$T''_D = \frac{1000}{2f \ln[(I''_G - I'_G) / (I_{\text{acc}G} - I'_G)]} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-40)$$

$$R_A = \frac{1000X''_D}{2\pi f T_A} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-41)$$

2.7.2 短路电流的计算

2.7.2.1 发电机馈送的短路电流

$$|Z'_{eG}| = \sqrt{(R_A + R_e)^2 + (X''_D + X_e)^2} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-42)$$

$$|Z'_{eG}| = \sqrt{(R_A + R_e)^2 + (X'_D + X_e)^2} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-43)$$

并需计及线路组抗对时间常数的影响。

(1) q 台相同规格发电机并联运行时

$$T_{\text{dec}G} = \frac{T_A + 1000(X_{gb} + qX_e) / 2\pi f R_A}{1 + (R_{gb} + qR_e) / R_A} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-44)$$

$$T''_{eG} = \frac{T''_D [1 + (X_{gb} + qX_e) / X'_D]}{1 + (X_{gb} + qX_e) / X'_D} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-45)$$

(2) $q = (q_1 + q_2)$ 台不同规格发电机并联运行时

$$T_{\text{dec}G} = \frac{T_A + (1000 X_e / 2\pi f R_A)}{1 + (R_e / R_A)} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-46)$$

$$T''_{eG} = \frac{T''_D [1 + (X_e / X'_D)]}{1 + (X_e / X'_D)} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-47)$$

$$\text{则得} \quad I''_G = \frac{U_N}{|Z'_{eG}|} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-48)$$

$$I'_G = \frac{U_N}{|Z'_{eG}|} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-49)$$

$$I_{\text{acc}G} = (I''_G - I'_G) e^{-T/2T''_{eG}} + I'_G \quad (\text{kA}) \quad (4.2-50)$$

$$I_{\text{ac}G} = 1.1 I_{\text{acc}G} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-51)$$

$$I_{\text{dc}G} = \sqrt{2} I'_G e^{-T/2T_{\text{dec}G}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-52)$$

$$I_{pG} = \sqrt{2} I_{\text{ac}G} + I_{\text{dc}G} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-53)$$

2.7.2.2 电动机馈送的短路电流

$$|Z'_{eM}| = \sqrt{(R_s + R_e)^2 + (X'_M + X_e)^2} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-54)$$

$$T_{\text{dec}M} = \frac{T_{\text{dec}M} + (1000 X_e / 2\pi f R_s)}{1 + (R_e / R_s)} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-55)$$

$$\text{则得} \quad I_{\text{ac}M} = \frac{U_N}{|Z'_{eM}|} e^{-T/2T_{\text{dec}M}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-56)$$

$$I_{\text{dc}M} = \frac{\sqrt{2} U_N}{|Z'_{eM}|} e^{-T/2T_{\text{dec}M}} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-57)$$

$$I_{pM} = \sqrt{2} I_{\text{ac}M} + I_{\text{dc}M} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-58)$$

2.7.2.3 短路点的短路电流

$$I_{\text{ac}} = I_{\text{ac}G} + I_{\text{ac}M} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-59)$$

$$I_p = I_{pG} + I_{pM} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-60)$$

当短路点至主汇流排的线路阻抗足够大时,例如在下列两种情况下,可不计及电动机馈送的短路电流,并可忽略发电机馈送的短路电流非周期性分量:

(1) 短路电路中不包含变压器时 $R_e \geq 3X''_D$ 。

(2) 短路电路中不包含变压器时 $|Z_e| \geq 5X''_D$ 。

此时

$$I_{\text{ac}} = I_{\text{ac}G} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-61)$$

$$I_p = I_{pG} = \sqrt{2} I_{\text{ac}G} \quad (\text{kA}) \quad (4.2-62)$$

2.7.3 在变压器二次侧短路时短路电流的计算

此种情况属于在主汇流排外馈电线处短路,应按本章 2.7.1 和本章 2.7.2 中有关公式和步骤进行计算,只是需将变压器的阻抗作为线路阻抗的一部分,并将变压器变比考虑在内即可

$$X_e = X_{e1} + X_T + X_{e2} (U_{N1} / U_{N2})^2 \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.3-63)$$

$$R_e = R_{e1} + R_T + R_{e2} (U_{N1} / U_{N2})^2 \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-64)$$

$$I_{\text{ac}2} = I_{\text{ac}} (U_{N1} / U_{N2}) \quad (\text{kA}) \quad (4.2-65)$$

$$I_{p2} = I_p (U_{N1} / U_{N2}) \quad (\text{kA}) \quad (4.2-66)$$

2.8 短路功率因数的计算

2.8.1 主汇流排馈电分路配电电器出线端处的短路功率因数计算

$$\begin{aligned} Z_{kb} &= R_{kb} + jX_{kb} \\ &= \frac{1}{1/(R_A + jX''_D) + 1/(R_s + jX'_M)} \quad (\text{m}\Omega) \end{aligned} \quad (4.2-67)$$

经计算

$$X_{kb} = \frac{X'_M (R_A^2 + X''_D^2) + X''_D (R_s^2 + X'_M^2)}{(R_A + R_s)^2 + (X''_D + X'_M)^2} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-68)$$

$$R_{kb} = \frac{R_s (R_A^2 + X''_D^2) + R_A (R_s^2 + X'_M^2)}{(R_A + R_s)^2 + (X''_D + X'_M)^2} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-69)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{R_{kb}}{\sqrt{R_{kb}^2 + X_{kb}^2}} \quad (4.2-70)$$

2.8.2 发电机自动开关电源端处的短路功率因数计算

当有 q 台发电机并联运行时,则在其中任何一台发电机自动开关电源端处的短路电路阻抗为

$$\begin{aligned} Z_k &= R_k + jX_k \\ &= \frac{1}{\sum_{i=1}^{q-1} [1/(R_{gi} + jX''_{gi})] + [1/(R_s + jX'_M)]} \quad (\text{m}\Omega) \end{aligned} \quad (4.2-71)$$

式中: $i=1, 2, \dots, q-1$ 。

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (4.2-72)$$

因式 (4.2-71) 计算繁琐,也可按式 (4.2-68) ~ 式

(4.2-70) 计算。

2.8.3 主汇流排外馈电线处的短路功率因数计算

$$X_k = X_{kb} + X_e \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-73)$$

$$R_k = R_{kb} + R_e \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-74)$$

$$\cos\varphi_k = \frac{R_k}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (4.2-75)$$

2.9 电抗、电阻、阻抗和时间常数的计算与换算

2.9.1 发电机电抗和电阻的换算

$$X''_d = x''_d \frac{U_N}{I_{Ng}} = x''_d \frac{U_N^2}{S_{Ng}} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-76)$$

$$X'_d = x'_d \frac{U_N}{I_{Ng}} = x'_d \frac{U_N^2}{S_{Ng}} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-77)$$

$$R_a = r_a \frac{U_N}{I_{Ng}} = r_a \frac{U_N^2}{S_{Ng}} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-78)$$

2.9.2 电动机电抗、电阻和时间常数的计算与换算

$$X'_M = x'_M \frac{U_{NM}}{\sqrt{3}I_{NM}} = x'_M \frac{U_{NM}^2 \eta_M \cos\varphi_M}{P_{NM}} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-79)$$

$$R_S = r_s \frac{U_{NM}}{\sqrt{3}I_{NM}} = r_s \frac{U_{NM}^2 \eta_M \cos\varphi_M}{P_{NM}} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-80)$$

$$T'_{acm} = \frac{1000x'_m}{2\pi f r_s} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-81)$$

$$T_{dcm} = \frac{1000x_m}{2\pi f r_s} \quad (\text{ms}) \quad (4.2-82)$$

2.9.3 变压器电抗、电阻和阻抗的计算与换算

$$|Z_T| = u_k \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-83)$$

$$R_T = P_k \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}^2} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-84)$$

$$X_T = \sqrt{|Z_T|^2 - R_T^2} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-85)$$

$$R_T = \gamma_T \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} = u_R \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-86)$$

$$X_T = x_T \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} = u_x \frac{U_{NT}^2}{S_{NT}} \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-87)$$

2.9.4 电缆电抗和电阻的计算

$$R = rl/a \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-88)$$

$$X = xl/a \quad (\text{m}\Omega) \quad (4.2-89)$$

3 同步发电机的保护

3.1 过载保护

为防止过载情况下发电机温度及发电机电缆温度的过分升高,可采用保护装置中的长延时脱扣器实现发电机的过载保护。

过载保护应与发电机的热容量相适应。长延时脱扣器的始动整定值应满足下列要求:

(1) 过载小于 10%,建议设一带延时的音响报警器,其最大整定值应为发电机额定电流的 1.1 倍,延时时间不超过 15min。

(2) 过载 10%~50%之间,经少于 2min 的延时断路器应分断。

(3) 在有自动分级卸载装置时,通常可取发电机输出电流的过载信号作为自动分级卸载装置的输入信号。自动分级卸载装置的过载—卸载工作特性应与发电机断路器的过载保护特性相匹配,在同一过载信号下,自动分级卸载装置的卸

载延时应比发电机断路器的脱扣延时至少短 3s。

应当指出,由于船舶电站自动化程度的不断提高,为发电机的保护特别是过载保护提供了许多新的措施和手段。除上面已提到的自动分级卸载装置外,在自动化程度较高的船舶上还设有重载询问;负载自动分级启动;机械及电气参数的自动巡回检测、报警、自动处理和综合保护等装置,这样不但大大减少了故障发生的可能,而且也提高了保护的有效性和可靠性。

3.2 外部短路保护

保护通常采用框架式自动空气断路器,设置在发电机至相应配电板汇流排之间的连接电路上,用以迅速排除配电板汇流排上的低阻抗故障,并对下一级主汇流排跨线断路器、应急汇流排跨线断路器、汇流排馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。

为了实现保护的选择性,对少于三台机组并联运行的发电机皆采用短路短延时的保护方式;而对于有三台或三台以上并联运行机组的发电机,再加入具有截流特性(即短路电流超过整定的截流值时,保护将加速瞬时动作)的瞬时动作保护。

可见,对发电机外部短路保护方式的选用与起动值的整定,要综合考虑到保护的选择性、快速性、可靠性的要求。

短延时脱扣的始动电流整定值,应满足发电机在同步状态下起动最大负载以及异步电动机群由一个电源同时转接到另一个电源时都不产生误动作。根据国家标准的规定,其值应小于等于被保护发电机稳态短路电流的 80%,建议取发电机额定电流的 200%~250%。短延时脱扣的延时时间应大于该断路器之后任一通往用电负荷所与之串联的下一级断路器的短延时和分断时间之和,通常可取短延时脱扣的最长延时时间段。

当被保护的发电机可能与两台及两台以上发电机并联运行时,则利用断路器的瞬时脱扣特性来选择性地分断断路器发电机侧短路时的特大短路电流,以防止与之并联的发电机断路器的不合理分断,其始动电流的整定值应大于被保护发电机的最大非对称短路电流的 120%。

3.3 逆功率保护

几台同步发电机并联工作时,若其中一台发电机的原动机产生故障;或同步发电机在非同步条件下并车时,都可能出现逆功率,这将使其他与之并联的机组产生过载或影响电网的正常供电。因此当出现逆功时要将该发电机从电网上切除,以保证其他发电机的正常供电。逆功率的保护装置目前用的最多是感应式逆功率继电器。

根据国家标准的规定,对并联运行的每一台发电机组均应提供逆功率保护,通过逆功率继电器与发电机断路器脱扣器的配合,当逆功率值达到被保护发电机额定功率的 8%~15%(对柴油发电机组)或 2%~6%(对汽轮发电机组)或 3%~7%(对燃汽轮发电机组)时,应延时 3~10s 分断被保护发电机断路器。

当供电电压下降到额定电压的 50%时,逆功率保护不应失效,但其动作值可以有所改变。

3.4 欠电压保护

对于与其他发电机并联运行的发电机,应设有欠电压保护。欠电压保护的目的一是防止发电机不发电时闭合发电机断路器,避免发电机未经同步或其他原因与汇流条的误合

闸；目的之二是为了防止发电机电压消失时仍连接在汇流排上，这样将造成短路或其他故障。

当发电机组单独工作时，在某些故障情况下欠电压保护有时是使发电机断路器分断的唯一手段。这些故障常见的包括原动机的意外停车，发电机内部短路，励磁回路故障等。

根据我国钢质海船入级与建造规范规定，并联运行的发电机的欠电压保护满足如下要求：

(1) 用于避免发电机不发电时闭合断路器的场合应瞬时动作。

(2) 当电压降低至额定电压的 70%~35% 时，应经系统选择性保护要求的延时后动作。

通常延时时间应与过电流短延时动作特性相配合。例如对 DW914 型断路器，要求延时时间不得小于 0.4s，一般整定在 0.5~2s。

当然，如果采用独立的联锁装置或专用的自动控制装置，可以避免发电机未经同步或其他原因与汇流排误合闸以及发电机电压消失时仍连接在汇流排上时，也可以不单独设置欠电压保护。

3.5 船舶中压同步发电机的保护

船舶中压同步发电机除前述保护外，针对其本身可能出现的故障，还应设保护发电机内部相间短路的纵差动保护；保护发电机内部单相接地的零序过电流保护；转子接地保护等。

3.5.1 发电机的纵差动保护

纵差动保护是用来反应发电机内部定子绕组及引出线相间短路的，用于容量大于 1000kW 的发电机，是发电机的主要保护。

发电机纵差动保护装置原理接线图，如图 4.2-3 所示。这是按环流原理构成的差动保护装置。

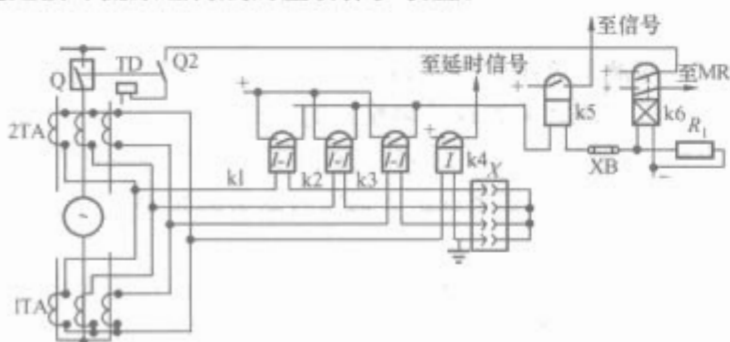


图 4.2-3 发电机纵差动保护装置原理接线图

发电机纵差动保护的整定计算，应按以下两个条件整定。

(1) 按躲开外部短路时的最大稳态不平衡电流整定。保护的起动电流值为

$$I_{qd} = K_k I_{bp \cdot \max} = 0.1 K_k K_{fzq} K_{tx} I_{d \cdot \max} / n_{TA}$$

式中： K_k 为可靠系数，取 1.3；0.1 为电流互感器最大相对误差； K_{fzq} 为非周期分量系数。用一般电流继电器时， K_{fzq} 取 1.5~2，用带速饱和变流器的差动继电器时， K_{fzq} 取 1； n_{TA} 为电流互感器变比； K_{tx} 为电流互感器同型系数，电流互感器同型号时， K_{tx} 取 0.5，不同型号时， K_{tx} 取 1； $I_{d \cdot \max}$ 为外部三相短路时最大周期性短路电流，取 $I_{d \cdot \max}$ 为 10 倍发电机额定电流，即 $I_{d \cdot \max} = 10 I_{fe}$ 。

由上述可得带速饱和变流器的发电机纵差动保护的起动电流值为

$$I_{qd} = 0.65 I_{fe} / n_{TA}$$

(2) 按避免二次断线时误动整定，保护的起动电流值为

$$I_{qd} = K_k I_{fe} = 1.3 I_{fe} / n_{TA}$$

最后，发电机纵差动保护的起动电流值，应按上两式中最大的一个整定。

发电机纵差动保护的灵敏度可按式检验

$$K_{lm} = \frac{I_{d \cdot \min}}{I_{qd}} > 2$$

式中： $I_{d \cdot \min}$ 为系统最小运行方式下，机端的两相短路电流。

对于断线监视继电器的整定，可按经验整定为

$$I_{qd} = 0.2 I_{fe} / n_{TA}$$

由以上整定可见，若不考虑二次断线问题，则起动电流按 $I_{qd} = 0.65 I_{fe} / n_{TA}$ 整定， I_{qd} 小于发电机额定电流，保护装置是比较灵敏的。若考虑二次断线问题，则起动电流需按 $I_{qd} = 1.3 I_{fe} / n_{TA}$ 整定， I_{qd} 大于发电机额定电流，保护装置的灵敏度要低些。而这种情况也就不需速饱和变流器了。

发电机是最重要的设备，希望保护能有较高的灵敏度。为此，应使纵差动保护的起动电流小于发电机额定电流。如果既要考虑二次断线不能误动问题，又要考虑提高纵差动保护灵敏度，可以采用具有平衡线圈的速饱和变流器构成的高灵敏度的纵差动保护装置。这种保护装置可使纵差动保护的起动电流值小于发电机额定电流值，并保证二次回路断线时保护不会误动作。

3.5.2 发电机定子绕组单相接地保护

发电机定子绕组单相接地保护的任务是当定子绕组发生单相接地时，使发电机跳闸或发出信号，以免发电机定子铁心烧坏。接地故障电流大于 5A 时，保护动作于跳闸；小于 5A 时，动作于信号。

单相接地时的特点，是产生零序电压和零序电流。根据零序电流，可发现是否接地和接地的位置及程度。所以，发电机定子绕组单相接地，一般采用零序过电流保护。

高压发电机的中性点是不接地的，所以是小电流接地系统。当发电机定子绕组发生单相接地产生零序电流时，流的是电容性的电流，该电流是较小的。因此，要考虑单相接地零序电流保护的灵敏性问题。

图 4.2-4 为带交流助磁的发电机定子绕组单相接地零序电流保护装置的原理接线图。为提高保护的可靠性和灵敏度，采用带交流助磁的零序电流互感器 TAO。

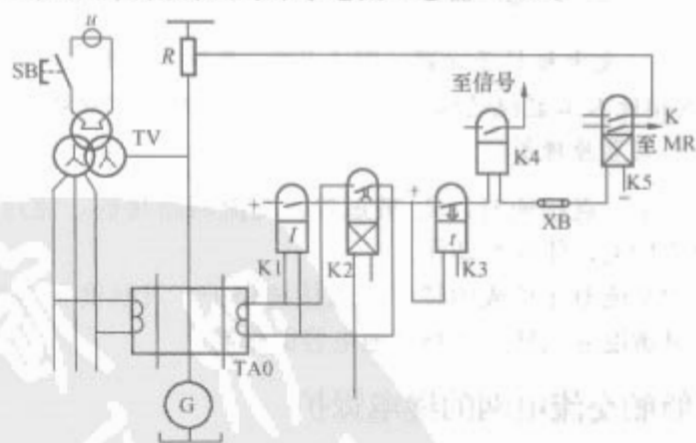


图 4.2-4 带交流助磁的零序电流保护装置原理接线图

发电机定子绕组单相接地零序电流保护的整定，应考虑以下因素。

(1) 保证保护的可靠性，在外部接地时不发生误动作，其起动电流应为

$$I_{qd} = K_k I_{cf}$$

式中： K_k 为可靠系数，可取 $K_k = 1.5$ ； I_{cf} 为发电机电容电流。

(2) 起动电流应大于正常情况下的不平衡电流, 即

$$I_{qd} = K_k I_{bp}$$

(3) 为保证灵敏度, 则起动电流应为

$$I_{qd} < 5A$$

此类保护需有一定大小的零序电流时才能动作, 因此不可避免的具有动作死区。

3.5.3 发电机转子回路接地保护

发电机转子回路接地保护的任务就是: 当发生一点接地时, 给信号; 当发生两点接地时, 动作于停机, 以保护发电机。考虑船舶有备用发电机, 所以当发生一点接地时, 就可发出信号, 手动切换机组; 或发出信号, 并自动发出备用机组自起动和故障机停机指令。所以, 可以只装转子回路一点接地保护装置。

转子回路一点接地的保护方案有: 人工监视绝缘装置及按电桥和直流、交流迭加等原理构成的自动保护装置。因近代船舶多为无人机舱, 所以有必要采用自动继电保护装置。

(1) 人工监视绝缘装置。发电机转子回路一点接地人工监视绝缘装置原理, 如图 4.2-5 所示。用两电压表监视一点接地。正常时, 两表指示一样, 当一点接地时, 两表指示不同, 若 U_1 低于 U_2 , 则表明正极对地绝缘下降。若绕组中点接点, 则 U_1 仍等于 U_2 , 所以该装置有死区。

(2) 叠加交流电压的转子绕组一点接地保护装置。叠加交流电压的转子绕组一点接地保护装置的原理图, 如图 4.2-6 所示。交流电压经变压器 T 变压后, 一端加在发电机励磁绕组 L 上, 另一端经电容 C 接到发电机轴上。C 起隔直作用, 将接地点与转子回路隔离。

正常时, 转子绝缘良好, 即绝缘电阻 R_g 相当大, 交流回路不通, 继电器 K 不动。

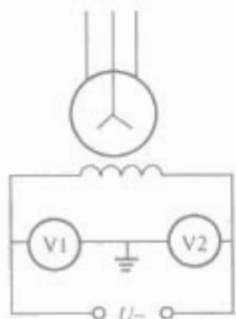


图 4.2-5 发电机转子回路一点接地人工监视绝缘装置原理图

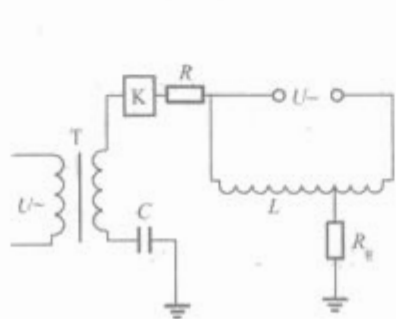


图 4.2-6 叠加交流电压的转子绕组一点接地保护原理图

发生一点接地时, R_g 被短接, 交流回路接通, 流过 K 的电流加大, 使保护动作。

加交流电压构成的转子一点接地保护, 灵敏度相当高, 但其灵敏度受到转子回路对地电容的限制。

4 船舶交流电网的继电保护

4.1 大容量交流电网的继电保护

4.1.1 主汇流排跨接电路(不同主配电板汇流排之间的连接电路)的保护

(1) 在船舶的主汇流排跨接电路上应选用框架式自动空气断路器来实施保护, 通常将这类断路器称为主汇流排跨线断路器。应尽可能在主汇流排跨接电路的两端各设一个主汇流排跨线断路器。

(2) 利用框架式自动空气断路器的长延时脱扣特性来保护主汇流排跨接电缆及有关的主发电机免遭过载和高阻抗故障

损坏, 对主汇流排跨接电缆所跨接的每一主配电板汇流排上只接有一台发电机的情况, 主汇流排跨线断路器长延时脱扣始动电流整定值应 \leq 主发电机断路器长延时脱扣始动电流整定值的 80%; 应 \geq 汇流排馈线断路器或馈线断路器长延时脱扣始动电流整定值的 120%; 应 \geq 流经该断路器的总负载电流的 150%。长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。对于主汇流排跨接电缆所跨接的主配电板汇流排上接有两台或两台以上发电机的情况, 对主汇流排跨线断路器的长延时脱扣可不作要求。

(3) 利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除主汇流排跨接电缆及有关主汇流排上的所有低阻抗故障, 并对汇流排馈线断路器及馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。对于主汇流排跨接电缆所跨接的每一主配电板汇流排上只接有一台发电机的情况, 主汇流排跨线断路器的短延时脱扣的始动电流整定值应 \leq 主发电机断路器短延时脱扣的始动电流整定值的 80%。对于其他情况, 短延时脱扣的始动电流整定值应 \geq 断路器本身的过电流检测器额定电流的 150%。短延时脱扣的延时时间应大于该断路器之后任一通往用电负载的与之串联的汇流排馈线断路器或馈线断路器的短延时和分断时间之和, 通常该延时时间段应小于主发电机断路器短延时脱扣的延时时间段。

(4) 对用于主汇流排跨接电路的框架式自动空气断路器通常不提瞬时脱扣要求。如该断路器设有瞬时脱扣装置, 则瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

(5) 主汇流排跨线断路器应具有足够的短时额定值, 以保证它与汇流排馈线断路器及馈线断路器之间的选择性保护。

4.1.2 应急汇流排跨接电路(主配电板汇流排与应急配电板汇流排之间的连接电路)的保护

(1) 在船舶的应急汇流排跨接电路上一般应选用框架式自动空气断路器来实施保护。通常将这类断路器称为应急汇流排跨线断路器。

应急汇流排跨线断路器应设置在应急汇流排跨接电路的两端。

(2) 应利用框架式自动空气断路器的长延时脱扣特性来保护应急汇流排跨接电缆及有关的主发电机免遭过载和高阻抗故障的损坏。长延时脱扣的始动电流整定值应 \leq 主发电机断路器长延时脱扣始动电流整定值的 80%; 应 \geq 应急配电板馈线断路器长延时脱扣始动电流整定值的 120%; 应 \geq 流经该断路器的总负载电流或应急汇流排跨接电路的额定电流的 150%。长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。

(3) 利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除应急汇流排及其跨接电路上的所有低阻抗故障, 并对应急汇流排馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。短延时脱扣的始动电流整定值应 \leq 主发电机断路器短延时脱扣始动电流整定值的 80%; 应 \geq 应急汇流排上任一馈线塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣始动电流整值的 120%。短延时脱扣的延时时间段应小于主发电机断路器短延时脱扣的延时时间段。

(4) 对用于应急汇流排跨接电路的框架式自动空气断路器通常不提瞬时脱扣要求。如该断路器设有瞬时脱扣装置, 则瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准

整定值。

(5) 所用断路器应具有足够的短时额定值,以保证它与应急配电板馈线断路器之间的选择性保护。

4.1.3 汇流排馈线电路(主配电板汇流排与负载中心汇流排之间的连接电路)的保护

(1) 在船舶的汇流排馈线电路上应选用框架式自动空气断路器来实施保护。通常将这类断路器称为汇流排馈线断路器。

汇流排馈线断路器应设置在汇流排馈线电路的主汇流排侧。

(2) 利用框架式自动空气断路器的长延时脱扣特性来保护汇流排馈线电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。长延时脱扣的始动电流整定值应 \leq 主汇流排跨线断路器长延时脱扣始动电流整定值的80%;应 \geq 流经该断路器的总负载电流的150%; \geq 所接负载中心馈线断路器最大长延时脱扣始动电流整定值的120%。长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。

(3) 利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除汇流排馈线电路及所接负载中心汇流排上的所有低阻抗故障,并对所接负载中心馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。短延时脱扣的始动电流整定值应 \leq 主汇流排跨线断路器短延时脱扣始动电流整定值的80%;应 \geq 该断路器之后任一通往用电负载的与之串联的下一级馈线塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣始动电流整定值的120%。短延时脱扣的延时时间应大于上述塑壳式自动空气断路器的分断时间,以及馈线框架式自动空气断路器的短延时和分断时间之和,通常该延时时间段应小于汇流排跨线断路器短延时脱扣的延时时间段。

(4) 对用于汇流排馈线电路的框架式自动空气断路器通常不提瞬时脱扣要求。如该断路器设有瞬时脱扣装置,则瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

(5) 汇流排馈线断路器应具有足够的短时额定值,以保证其与负载中心馈线断路器之间的选择性保护。

4.1.4 汇流排馈线电路(主配电板汇流排与区配电板汇流排之间的连接电路)的保护

(1) 通常采用塑壳式自动空气断路器做保护,并设置在主配电板一侧。

(2) 利用塑壳式自动空气断路器的长延时特性来保护汇流排馈线电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。其长延时始动电流整定值应 \leq 主汇流排跨线断路器长延时脱扣始动电流整定值的80%; \geq 流经该断路器总负载电流的150%; \geq 所接区配电板馈线断路器最大长延时脱扣始动电流整定值的120%。

(3) 对于汇流排馈线电路的塑壳式自动空气断路器通常不提瞬时脱扣要求。如该断路器设有瞬时脱扣装置,则瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

(4) 所用断路器应具有足够的短时额定值,以保证它与区配电板馈线断路器之间的选择性保护。

4.1.5 岸电箱中的保护

(1) 在船舶的岸电连接电路上一般应选用带熔断器的塑壳式自动空气断路器或塑壳式自动空气断路器加熔断器来实施保护。

(2) 应利用塑壳式自动空气断路器的反时限过电流脱扣特性来保护岸电连接电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。反

时限过电流脱扣器的始动电流整定值应等于或稍大于在正常情况下可能流经该断路器的最大持续电流。也可采用标准400A热元件。对于更高的用电要求,通过并列设置岸电箱来予以满足。

(3) 应利用塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣特性和熔断器的熔断特性来迅速排除岸电连接电路、有关的汇流排、汇流排跨接电路、汇流排馈线电路及馈线电路上的低阻抗故障。瞬时脱扣的始动电流整定值应为所选断路器的瞬时脱扣最大标准整定值。

(4) 岸电保护装置中所用的熔断器应选用高断流容量的熔断器,以起到对塑壳式自动空气断路器的后备保护作用。熔断器和塑壳式自动空气断路器的时间—电流特性应能相互匹配,以避免熔断器不必要的熔断和保护塑壳式自动空气断路器不受损坏。塑壳式自动空气断路器应能满意地分断熔断电流以下的所有故障电流。在塑壳式自动空气断路器正常分断时,熔断器应不会熔断、损坏或改变其保护特性。熔断器应在塑壳式自动空气断路器的任何损坏之前切断故障电流,故障电流切断后,未熔断的熔断器应保持其原来的特性。

(5) 在岸电箱内(上)应设有相序自动对接装置或相序测定器,以保证接入岸电的相序与船上电网的相序一致。

(6) 根据需要还可在岸电箱内设置断相保护和欠电压保护。

若设有断相保护,则应在发生一相(或两相)断电时,延时分断岸电供电电路,延时时间应不大于1min。

若设有欠电压保护,则应在供电电压下降到其额定电压的70%~35%时,瞬时分断岸电供电电路,并且当供电电压低于其额定电压的35%时,应能阻止合闸供电;当供电电压大于其额定电压的85%时,应能保证接通供电。

4.1.6 岸电馈线电路(岸电箱到主汇流排跨接电路或岸电箱到主配电板汇流排之间的连接电路)的保护

(1) 利用设置在船舶电源侧的塑壳式自动空气断路器的长延时脱扣特性,保护岸电馈线电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。其始动电流整定值应等于或稍大于在正常情况下可能流经该断路器的最大持续电流。

利用其瞬时保护迅速排除岸电馈线电路上的低阻抗故障。其始动整定值应 \geq 最大浪涌电流。

(2) 对于所要求的供电电流大于塑壳式自动空气断路器最大额定电流的电路采用框架式自动空气断路器作保护。此时长延时脱扣的始动电流整定值 \leq 主汇流排跨线断路器长延时脱扣始动电流整定值的80%; \geq 流经该断路器最大持续电流的150%。

利用其短延时保护特性的保护迅速排除岸电馈线上的低阻抗故障。其始动电流整定值应 \leq 主汇流排跨线断路器短延时脱扣始动电流整定值的80%;延时时间应小于汇流排跨线断路器短延时脱扣的延时时间段。

其瞬时保护通常不作要求,如该断路器设有瞬时脱扣装置,则瞬时脱扣的始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

(3) 如果要求船上的电站通过岸电连接电缆和岸电箱向他船或岸上的用电负载供电时,应在船舶的技术指标中予以明确,其原来的脱扣器整定值亦应作相应的调整。

(4) 如果为了防止船上的发电机与岸电并联而采取了将发电机断路器与岸电连接电路中的断路器互相连锁的措施,则应提供解除这种连锁的装置。

4.1.7 馈线电路（主配电板汇流排或负载中心汇流排至分配电板或单个重要负载的连接电路）的保护

(1) 采用装设于馈线电路电源侧的塑壳式空气断路器的长延时脱扣特性来保护馈线电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。长延时脱扣的始动电流整定值应等于或稍大于流经该断路器的总负载电流。

用断路器的瞬时保护特性来保护馈线电缆免遭低阻抗故障的损害。其始动电流整定值应 \geq 容量最大的电动机起动电流的1.6倍与其余负载满载电流的算术和； \leq 最小短路电流的80%。 \geq 该断路器过电流脱扣器额定电流的1200%（如仅向一个变压器供电）。 \geq 下一级塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣始动电流整定值；当向带有熔断器的电路供电时，整定值应足够高，以防止误脱扣。

(2) 在断路器断流容量不足的情况下，应采用带限流熔断器的塑壳式自动空气断路器或在断路器的电源侧增设起后备保护作用的熔断器。熔断器和断路器的时间—电流特性应能相互匹配，具体要求见本章4.1.5。

(3) 在馈线至负载的每一条供电通路中，串联的塑壳式自动空气断路器不应多于2个。

(4) 对于总负载电流超过塑壳式自动空气断路器最大额定电流的电路中采用框架式自动空气断路器作馈线电路的保护。其长延时脱扣始动电流整定值应 \leq 主汇流排跨线断路器或汇流排馈线断路器长延时脱扣始动电流整定值的80%。 \geq 流经该断路器的总负载电流的150%。

用其短延时保护特性来迅速排除馈线电路上的低阻抗故障，并对下一级塑壳式自动空气断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。其始动电流整定值应 \leq 主汇流排跨线断路器或汇流排馈线断路器短延时脱扣始动电流整定值的80%。 \geq 下一级塑壳式自动空气断路器瞬时脱扣最大始动电流整定值的120%。延时整定值应超过下一级塑壳式自动空气断路器的分断时间，通常取最短延时时间段。

在故障电流可能超过该断路器的短时额定值时需采用其瞬时保护特性的保护，此时始动电流整定值应取为断路器本身的最大标准整定值。

4.1.8 单个负载电路（分配电板至单个用电负载的连接电路）的保护

(1) 采用设置于负载电路电源侧的塑壳式自动空气断路器的长延时保护特性保护电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。其始动电流整定值应等于或稍大于负载的满载电流。

用断路器的瞬时保护特性保护电缆免遭低阻抗故障的损害。其始动电流整定值应 \leq 最小短路电流的80%； \geq 直接起动电动机额定电流的1200%（若采用减压起动或转子变阻起动，则按起动电流的减小成比例地减小）； \geq 该断路器过电流脱扣器额定电流的1200%（向单个变压器供电时）。

(2) 对可以不需要分断特性的单个负载供电电路，在断流容量、保护的选择性以及熔断器的有关限用要求均能得到满足的前提下，可采用熔断器进行保护，熔体的额定值应满足下列要求：

对变压器或非电感性负载，等于或稍大于负载额定电流的125%。

对电动机负载，取为额定负载电流的350%~400%。

4.1.9 负载组电路（分配电板至某个用电负载组的连接电路，每个用电负载组由多个低容量用电负载组成且共用一个配电保护装置）的保护

(1) 本节保护方式仅适用于低容量负载，按负载的不同类型分组，且每组负载的总负载电流不应超过15A。

(2) 采用装设于电路电源侧的塑壳式自动空气断路器的长延时保护特性来防止高阻抗故障。其始动电流整定值应等于或稍大于总负载电流。

用断路器瞬时保护特性防止低阻抗故障。其始动电流整定值应 \geq 最大浪涌电流。

4.1.10 控制或仪表用电压线圈、指示灯、抗干扰电容器及冲击电压抑制器电路的保护

(1) 采用装设于电路电源侧的熔断器作短路保护。所用熔断器应具有足够的分断能力，以提供有效保护。

(2) 对于同时满足下列四个条件的指示灯以及同时满足下列前三个条件的电压线圈、抗干扰电容器和冲击电压抑制器，可以免设保护。

安装在设备外壳内或外壳上；由设备内部电路供电；设备本身具有电路保护装置且保护装置的额定电流小于25A；指示灯电路的故障不会导致重要设备失电。

4.1.11 事故电路的保护

(1) 采用装设于电路电源侧的塑壳式自动空气断路器的长延时保护特性保护事故电力电缆免遭过载及高阻抗故障的损害。其始动电流整定值应等于或稍大于纵向事故电力电缆的安全载流量。

利用断路器的瞬时保护功能迅速排除事故电力电缆的低阻抗故障。其始动电流整定值应 \geq 反时限过电流脱扣器额定电流的120%。

(2) 在断路器断流容量不足的情况下，可按本章4.1.7(2)的办法处理。

4.1.12 主发电机、应急发电机或停泊发电机至相应配电板汇流排之间的连接电路的保护

由于这一段线路电缆的截面是按发电机额定容量选择的，所以当配电板汇流排及其下级断路器之后的所有线路出现高阻抗故障或低阻抗故障时，均可与发电机共用一套保护装置。具体保护方案见本章3.1节和3.2节相关内容。

4.2 小容量交流电网的继电保护

4.2.1 主汇流排跨接电路的保护

(1) 在舰船的主汇流排跨接电路上选用塑壳式自动空气断路器实施保护。尽可能在主汇流排跨接电路两端各设一个主汇流排跨线断路器。

(2) 利用塑壳式自动空气断路器的长延时过电流脱扣特性来保护主汇流排跨接电缆及有关的主发电机免遭过载和高阻抗故障的损害。过电流脱扣器的始动电流整定值应等于或稍大于可能流经该断路器的总的负载电流。

(3) 利用塑壳式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除主汇流排跨接电路和有关汇流排上的所有低阻抗故障，并对下一级馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。短延时脱扣的始动电流整定值应 \leq 主发电机稳态短路电路的90%。短延时脱扣的延时时间应超过下一级馈线断路器的分断时间。

4.2.2 应急汇流排跨接电路的保护

采用塑壳式自动空气断路器作保护，设置在电路的两端，利用其长延时脱扣特性来保护应急汇流排跨接电路电缆及有关的主发电机组免遭过载及高阻抗故障的损害。其始动电流整定值应等于或稍大于流经该断路器的总负载电流。

4.2.3 岸电箱中的保护

其保护装置类型、安装部位、保护特性及其相关要求与大容量交流电网继电保护中的岸电箱中的保护相同。

4.2.4 岸电馈线电路的保护

保护的各項要求与大容量交流电网继电保护〔见本章4.1.6中的(1)、(3)、(4)〕的要求相同。

4.2.5 馈线电路的保护

利用设置在电路电源侧的塑壳式自动空气断路器作相关保护、对保护特性的要求及其他要求与本章4.1.7(1)、(2)、(3)的要求相同。

4.2.6 单个负载电路或负载组电路的保护

采用设置于电路电源侧的熔断器作保护,熔体的额定电流值应满足下列要求:对于变压器或非电感性负载,等于或稍大于负载额定电流的125%。对电动机负载,取为额定负载电流的350%~400%。

4.2.7 控制和仪表用电压线卷、指示灯、抗干扰电容器以及冲击电压抑制器电路的保护

采用设置于电路电源侧的熔断器作保护,有关免设保护的要求与本章4.1.10(2)的规定相同。

4.2.8 事故电路的保护

采用设置于电路电源侧的塑壳式自动空气断路器作保护。对保护特性的要求及其他要求与4.1.11中的规定相同。

4.2.9 主发电机、应急发电机或停泊发电机至相应配电板汇流排之间的连接电路的保护

由于这一段线路电缆的截面是按发电机额定容量选择的,所以当配电板汇流排及其下级断路器之后的所有线路出现高阻抗故障或低阻抗故障时,均可与发电机共用一套保护装置(框架式或塑壳式空气断路器)。具体保护方案可参见本章3.1节和3.2节相关内容。

4.3 照明系统的保护

4.3.1 馈线电路(照明配电板至照明干线配电箱的连接电路)的保护

采用设置于电路电源侧的塑壳式自动空气断路器作保护。利用断路器长延时脱扣保护干线电缆免遭高阻抗故障的损害。其始动电流整定值应等于或稍大于总负载电流;不小于任一串联熔断器熔体额定值的75%。

利用断路器瞬时脱扣迅速排除馈线电路上的低阻抗故障。其始动电流整定值应等于过电流脱扣器额定电流的600%~700%; \leq 最小短路电流的80%(对交流)。

4.3.2 干线电路的保护

(1) 采用设置于电路电源侧的塑壳式自动空气断路器作保护。利用断路器长延时特性保护干线电缆免遭高阻抗故障的损害。其始动电流整定值应等于或稍大于总负载电流;不小于任一串联熔断器熔体额定值的75%。

利用断路器瞬时保护特性迅速排除干线电路上的低阻抗故障。其始动电流整定值应等于过电流脱扣器额定电流的600%~700%; \leq 最小短路电流的80%(对交流)。

(2) 亦可采用设置在电路电源侧上的熔断器作相应保护。其熔体的额定值应满足下列要求。

- 1) 等于或稍大于总负载电流的125%。
- 2) 等于或稍大于下一级干线熔断器熔体额定值的150%。

4.3.3 干线分支电路的保护

采用设置于电路电源侧的熔断器作保护。其熔体额定值应满足下列要求:①等于或稍大于总负载电流的125%;②等于或稍大于下一级支线熔断器熔体额定值的150%。

4.3.4 支线电路的保护

采用设置于电路电源侧的熔断器作保护。其熔体额定值应等于或稍大于总负载电流的125%。

4.3.5 重要直流应急照明干线电路的保护

采用设置于电路电源侧的高断流容量熔断器作保护。该熔断器应通过双刀单掷开关直接接至蓄电池并能保护蓄电池免遭应急照明网络短路故障的损害。

5 船舶直流电力系统的继电保护

5.1 发电机电路的保护

(1) 采用设置在发电机至主汇流排电路中的框架式自动空气断路器作保护。

(2) 利用断路器长延时脱扣特性来防止过载情况下发电机和发电机连接电缆温度的过分升高。始动电流整定值可根据发电机组的配置及工作情况取为被保护发电机额定电流的110%~150%的标准整定值。

(3) 利用框架式自动空气断路器的短延时脱扣特性来迅速排除配电板汇流排上的低阻抗故障,并对下一级主汇流排跨线断路器、应急汇流排跨线断路器、汇流排馈线断路器以及馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。短延时脱扣的始动电流整定值小于等于发电机额定电流(电压为280V时的额定输出电流)的300%。短延时脱扣的延时时间应大于该断路器之后任一通往用电负载的与之串联的下一级断路器的短延时和分断时间之和,通常可取短延时脱扣的最长延时时间段。

(4) 采用断路器瞬时保护使换向器火花的危害程度减至最小。始动电流整定值 \leq 被保护发电机额定电流的600%。

(5) 两个绝缘极的过电流信号均应能使发电机断路器脱扣。

对并联运行的每台发电机均应提供逆流保护(电动发电机除外),当逆流值达到被保护发电机额定电流的5%时,应瞬时分断发电机断路器。对于汽轮发电机组或燃气轮发电机组,在其原动机的超速保护装置动作时应通过分励脱扣器使发电机断路器脱扣。

当供电电压下降至额定电压的50%时,逆流保护不应失效,但其动作值可以有所改变。若有均压线,则逆流保护应设在发电机的正极。

5.2 直流电网的继电保护

5.2.1 主汇流排跨接电路的保护

(1) 采用装设于电路两端的框架式自动空气断路器作保护。

(2) 断路器长延时保护功能,及对始动电流整定值的要求与本章4.1.1(2)的要求相同。

(3) 断路器短延时保护功能及对整定值的要求与本章4.1.1(3)的要求相同。

(4) 断路器瞬时保护用在短路电流可能超过该断路器短时额定值的情况下,保护该断路器。其他情况通常不要求。

若断路器需要该项保护,则始动电流整定值整定在断路器短时额定值的80%左右。如断路器不需该项保护,而它本身又带有瞬时脱扣装置,则取为最大标准整定值。

5.2.2 应急汇流排跨接电路的保护

(1) 采用设置于电路两端的塑壳式自动空气断路器作保护。利用其长延时脱扣特性保应急汇流排跨接电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。其始动电流的整定值应等于或稍大于流经该断路器的总负载电流。

利用其瞬时脱扣特性,迅速排除应急汇流排及其跨接电路上的所有低阻抗故障。其始动电流整定值 \leq 最小短路

电流。

(2) 在总负载电流或安装点的预期最大短路电流很大,塑壳式自动空气断路器不能胜任时可采用框架式自动空气断路器作相应保护。

1) 此时长延时脱扣始动电流整定值 \geq 流经该断路器的总负载电流的150%。

2) 断路器短延时保护功能及对整定值的要求与本章4.1.2(3)的要求相同。

3) 断路器的瞬时保护用在应急配电板馈线塑壳式自动空气断路器断流容量不足的情况下,迅速分断超过上述断路器额定分断电流的所有故障电流。其他情况通常不要求。

4) 如下一级断路器要求该项保护,则始动电流整定在最小被保护断路器额定分断电流的90%左右。

5) 如下一级断路器不要求该项保护,而断路器本身又设有瞬时脱扣装置,则取为最大标准整定值。

5.2.3 汇流排馈线电路的保护

电路保护所用装置型式、配置位置、长延时和短延时保护功能及对整定值的要求与本章4.1.3(1)、(2)、(3)的要求相同;断路器瞬时保护功能及对始动电流整定值的要求与本章5.2.1(4)的要求相同。

5.2.4 岸电箱中的保护

(1) 采用装置在岸电箱中的塑壳式自动空气断路器作保护。用断路器的长延时脱扣特性保护岸电馈线电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。其始动电流整定值等于或稍大于在正常情况下可能流经该断路器的最大持续电流。

利用断路器瞬时脱扣特性来迅速排除岸电馈线电路、有关的汇流排、汇流排跨接电路及汇流排馈线电路上的所有低阻抗故障。其始动电流整定值应取为断路器本身最大标准整定值。

(2) 在总负载电流或安装点的预期最大短路电流很大,塑壳式自动空气断路器不能胜任时,应采用框架式自动空气断路器作相应保护。其长延时始动电流的整定值约为在正常情况下可能流经该断路器的最大持续电流的150%。

用断路器的短延时保护特性来迅速排除岸电馈线电路以及汇流排跨接电路或主配电板汇流排上的低阻抗故障,并对汇流排跨线断路器或汇流排馈线及馈线断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。

短延时脱扣始动电流整定值若岸电馈线接在汇流排跨接电路上,则取为与汇流排跨线断路器的短时脱扣始动电流整定值相同;若岸电馈线接在主配电板汇流排上,则取为在正常情况下可能流经该断路器的最大持续电流的300%。其延时整定值应超过汇流排跨线断路器的短延时和分断时间之和。

断路器瞬时保护功能及对始动电流整定值的要求与本章5.2.1(4)的要求相同。

(3) 若流经岸电馈线电路的最大持续电流不大于200A,则允许采用熔断器进行保护,熔体的额定值应取为岸电馈线电路最大持续电流的125%。

5.2.5 岸电馈线电路的保护

(1) 采用设置在电路船舶电源侧的塑壳式自动空气断路器作保护。其长延时和瞬时脱扣保护的功能及对始动电流整定值的要求与本章4.1.6(1)的要求相同。

(2) 当所要求的供电电流很大,塑壳式自动空气断路器不能胜任而采用框架式自动空气断路器作保护时,其长延时、短延时和瞬时脱扣保护的功能及对整定值的要求与本章4.1.6(2)的要求相同。

(3) 同本章4.1.6中(3)。

(4) 同本章4.1.6中(4)。

5.2.6 馈线电路的保护

(1) 采用设置在电路电源侧的塑壳式自动空气断路器作相应保护。其长延时和瞬时脱扣保护的功能及对整定值的要求与本章4.1.7(1)的要求相同。

(2) 当总的负载电流或安装点的预期最大短路电流很大,塑壳式自动空气断路器不能胜任时,可采用框架式自动空气断路器作相关保护。此时长延时脱扣始动电流整定值整定为流经该断路器总负载电流的150%。

利用断路器短延时保护特性来迅速排除馈线电路上的低阻抗故障,并对下一级塑壳式自动空气断路器之后的所有低阻抗故障提供与这些断路器之间的选择性保护。

短延时脱扣始动电流整定值应 \leq 主汇流排跨线断路器或汇流排馈线断路器短延时脱扣始动电流整定值的80%; \geq 下一级塑壳式自动空气断路器瞬时脱扣始动电流整定值的120%; \geq 最大浪涌电流的125%。其延时整定时间应超过下一级塑壳式自动空气断路器的分断时间,通常取最短延时时间。

在下一级塑壳式自动空气断路器断流容量不足的情况下,可利用断路器的瞬时脱扣功能,以便迅速分断超过上述断路器额定分断电流的所有故障电流。对其他情况通常不要求瞬时保护。需要时,其始动电流整定值应整定在最小被保护断路器额定分断电流的90%左右;若下一级断路器不要求该项保护,而断路器本身又设有瞬时脱扣装置,则取为最大标准整定值。

(3) 在馈线至负载的每一条供电通路中,串联的塑壳式自动空气断路器不应多于2个。

对可以不需要分断特性的馈线电路,在断流能力、保护的选择性及熔断器的有关限用要求均能得到满足的前提下,可采用熔断器进行保护,熔体的额定值应约为总负载电流的125%。

5.2.7 单个负载电路的保护

(1) 采用设置于电路电源侧的塑壳式自动空气断路器作保护。利用断路器长延时脱扣保护电缆免遭过载和高阻抗故障的损害。其始动电流整定值应等于或稍大于负载的满载电流。

利用断路器瞬时脱扣保护电缆和设备免遭低阻抗故障的损害。其始动电流整定值应 \leq 最小短路电流的80%。

(2) 对可以不需要分断特性的单个负载电路,在断流能力、保护的选择性以及熔断器的有关限用要求均能得到满足的前提下,可采用熔断器进行保护,熔体的额定值应约为负载满载电流的125%。

5.2.8 控制或仪表用电压线圈、指示灯、抗干扰电容器以及冲击电压抑制器电路的保护

采用设置在电路电源侧的熔断器作保护。所用熔断器应具有足够的分断能力以提供有效的短路保护。

对于同时满足下列四个条件的指示灯以及同时满足下列前三个条件的电压线圈、抗干扰电容器和冲击电压抑制器,可以免设保护:

安装在设备外壳内或外壳上;由设备内部电路供电;设备本身具有电路保护装置且保护装置的额定电流小于25A;指示灯电路的故障不会导致重要设备失电。

5.3 特别说明

(1) 文中的“ \geq ”和“ \leq ”符号是用来描述断路器脱扣

特性始动电流整定值的专用符号。对于断路器的某种脱扣特性的始动电流整定值,如果仅用了“ \geq ”(或“ \leq ”)符号来描述,则表示该整定值应为最接近但不小于(或不大于)符号后而所描述的标准整定值。对于断路器的某种脱扣特性的始动电流整定值,如果用了两个或两个以上“ \geq ”和“ \leq ”符号来描述,则它们仍代表通常理解的“大于等于”和“小于等于”之意。而被描述的始动电流整定值应为同时满足所列的两个或两个以上不等式的标准整定值。若所列的两个或两个以上不等式在实际应用中出现了矛盾,则对被描述的始动电流整定值应作视情处理。

(2) 文中对主汇流排跨线断路器、应急汇流排跨线断路器和汇流排馈线断路器长、短延时脱扣特性的始动电流整定值所作的规定仅适用于所有主发电机容量相等的船舶。当主发电机的容量不等时,可根据实际的设备和使用情况,参照执行这些规定。

(3) 文中所说的“下一级保护装置”系指按电能的传输方向通往用电负载的、与所描述的断路器直接串联的而且在保护级别上相对较低的保护装置。

(4) 文中框架式自动空气断路器长延时脱扣的延时时间应保证在其始动电流整定值的基础上满足系统选择性保护的要求。

6 设备的保护

6.1 电动机的保护

(1) 除本节 6.1.7 和 6.1.8 所述情况之外,额定功率超过 0.5kW 的电动机及其他重要用途的电动机均应设有独立的过载和短路保护。若电动机由专用电缆供电,且该供电电缆电源侧的保护装置能同时为电动机提供有效的短路保护,则可以不再为电动机另设专门的短路保护装置。

(2) 对于连续工作制的电动机,其过载保护装置的最大持续电流应整定(或选取)为电动机额定电流的 105%~125%。对于短时或断续工作制的电动机,其过载保护装置的最大持续电流应根据电动机的实际选用情况及工作情况进行整定(或选取)。

(3) 过载保护装置的时间—电流特性无法与电动机的起动特性相适应时,允许采用自动控制措施使得该保护装置在电动机的起动过程中暂时不起作用,但在电动机转入稳定运行后,应立即恢复其正常的保护功能。

(4) 如果在三相电动机的供电电路中接有熔断器,则应设有防止该电动机单相运转的保护。

(5) 除舵机电动机外,交流电动机均应设有欠电压保护。当供电电压在正常频率下下降到额定电压的 20% 左右时,保护装置应能瞬时或延时(根据需要而定)分断电路。当供电电压超过额定电压的 85% 时,保护装置应允许电动机起动。

(6) 根据电动机对供电连续性的不同要求,选择合适的失电之后又恢复供电的保护。通常可按电动机对供电连续性要求的递减顺序,依次选用下列几种保护方式。

1) 电压恢复后立即自行起动。

2) 电压恢复后延时自行起动,(延时可由短到长分若干档次)。

3) 电压恢复后不再自行起动。

电压恢复后自行起动一般应按正常的起动程序进行,同时应注意防止由于成组电动机的起动而产生过大的冲击电流和导致过大或持续时间过长的电网电压跌落。

电压恢复后不再自行起动的电动机应设有零位保护。

(7) 电动或电动液压舵装置中的电动机及其控制设备应只设短路保护,而不允许设过载和欠电压保护。若采用塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣特性来承担上述短路保护,则其始动电流整定值对直流应取为 300%~400% 的电动机额定电流,对交流应取为等于或稍大于电动机起动电流的 125%。若用熔断器来承担上述短路保护,则熔体的额定电流应比电动机的起动电流高一档,但若通过短路电流计算确认实际的短路电流小于电动机的起动电流时,应酌情降低熔体的额定电流值。

(8) 直流幅压电动机,可以不设过载保护,若要求设置时,保护装置的整定(或选取)必须考虑电压变化所引起的极限情况。如条件允许,也可设置超速保护。

(9) 额定功率大于 5.5kW (交流 380V) 的异步电动机不宜采用熔断器作为其配电电路的末级保护。

(10) 电动机通过自动转换开关由多路馈电线供电,则设置在这些馈电线路上的保护装置应能承受由于自动转换开关的延时转换所形成的过电流而不发生误动作。

6.2 变压器的保护

6.2.1 低压系统变压器的保护

(1) 变压器电路应设有短路保护和过载保护。短路保护应设在变压器二次侧,过载保护可以设在变压器二次侧;当变压器的容量对其供电的电路不可能处于过载状态时,则变压器可不设过载保护。短路保护装置的瞬动整定值应考虑变压器励磁冲击电流的影响;通常可由整定值 I_1 (标么值,即相对于过电流脱扣器额定电流 I_0 的倍数) 下式给出

$$I_1 \geq I_{ST}/I_e$$

式中: I_{ST} 为变压器回路的接通电流。可由下式决定

$$I_{ST} = K n_x I_{eT}$$

$K=1.1$ (变压器功率 $P_T < 1.5\text{kVA}$) $=1.5$ ($25\text{kVA} < P_T < 100\text{kVA}$) $=1.8$ ($P_T > 100\text{kVA}$)

式中: n_x 为变压器空载电流对额定电流的百分数; I_{eT} 为变压器一次绕组额定电流。

(2) 并联运行变压器的二次电路应设有隔离设施。

(3) 变压器一次电路保护装置与二次的负载电路保护装置的设置应尽可能做到有选择性的配合。

6.2.2 中压系统变压器的保护

(1) 变压器的电流速断保护。变压器电流速断保护是用来反应变压器绕组、引出线及套管上短路故障的。

变压器电流速断保护的原理图如图 4.2-7 所示。电流速断保护装置装于电源侧。

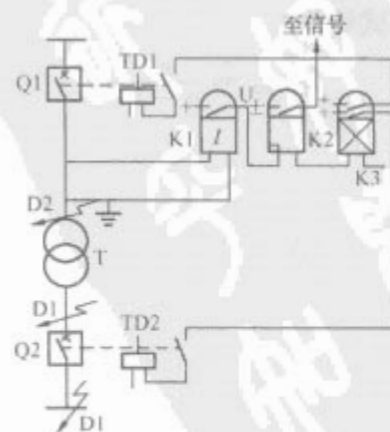


图 4.2-7 变压器电流速断保护原理图

变压器电流速断保护起动电流 I_{sd} 的整定应考虑以下因素。

1) 应躲过变压器低压负荷侧母线上 D1 点短路时流过保护装置的最大短路电流, 即

$$I_{qd} = K_k I_{d \cdot \max}$$

式中: K_k 为可靠系数, 取 1.2~1.3; $I_{d \cdot \max}$ 为 D1 点三相短路周期分量有效值换算到高压侧的电流值。

2) 躲过变压器空载投入时的励磁涌流, 通常取

$$I_{qd} = (3 \sim 5) I_{Te}$$

式中: I_{Te} 为保护安装侧变压器的额定电流。

起动电流按上两值中大者整定。

因整定是按末端短路整定的, 所以当外部短路时不动, 因此没有必要和外部配合, 可以瞬时动作跳闸。

变压器电流速断保护的灵敏度, 按保护装置的安装处在系统最小运行方式下发生两相短路的短路电流来校验, 即

$$K_{lm} = \frac{I_{d \cdot \min}^{(2)}}{I_{qd}} \geq 1.2$$

式中: $I_{d \cdot \min}^{(2)}$ 为系统最小运行方式下, 保护安装处两相短路时的最小短路电流。

(2) 变压器的过电流保护。变压器过电流保护的任务是反应变压器外部短路时引起变压器绕组的过电流, 所以它是变压器外部短路的远后备保护, 并作变压器内部短路的近后备保护。

变压器过电流保护的原理图如图 4.2-8 所示。保护装置装在电源侧, 除可保护外部短路外, 还可作内部短路之后备。

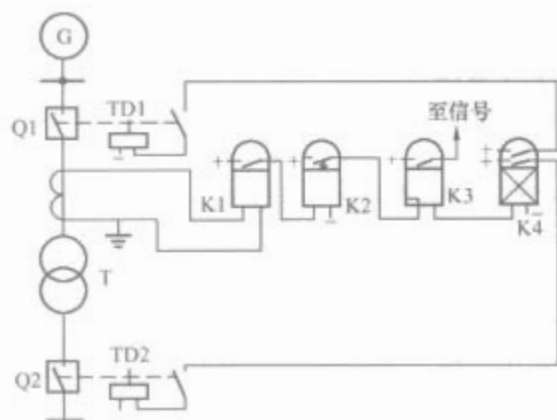


图 4.2-8 变压器过电流保护原理图

变压器过电流的起动电流按躲开最大负荷电流整定, 即

$$I_{qd} = \frac{K_k}{K_h} I_{fh \cdot \max}$$

式中: K_k 为可靠系数, 取 1.2~1.3; K_h 为返回系数, 取 0.85; $I_{fh \cdot \max}$ 为变压器最大负荷电流。

变压器最大负荷的计算应考虑以下因素。

1) 并联运行变压器一台切除时出现的最大负荷, 同容量变压器时按下式计算

$$I_{fh \cdot \max} = \frac{n}{n-1} I_{Te}$$

式中: n 为并列运行变压器最少台数; I_{Te} 为每台变压器额定电流。

2) 电动机起动时的最大电流, 即

$$I_{fh \cdot \max} = K_{zq} I'_{fh \cdot \max}$$

式中: K_{zq} 为电动机自起动系数, 取 1.3; $I'_{fh \cdot \max}$ 为正常运行时的最大负荷电流。

变压器过电流保护动作时限按阶梯原则整定, 即

$$t_T = t_{l \cdot \max} + \Delta t$$

式中: t_T 为变压器过电流保护动作时限; $t_{l \cdot \max}$ 为低压母线出线中保护动作最大时限; Δt 为时限级差, 取 0.5s。

变压器过电流保护的灵敏度按下式校验

$$K_{lm} = \frac{I_{d \cdot \min}}{I_{qd}} \geq 1.2$$

式中: $I_{d \cdot \min}$ 为最小运行方式下, 低压母线两相短路电流。

若灵敏度不满足要求, 可采用低电压起动或复合电压起动的过电流保护。

(3) 变压器的过负荷保护。变压器过负荷保护的任务是反应变压器因过负荷引起的过电流。变压器过负荷保护的原理, 如图 4.2-9 所示。保护装置装于电源侧。

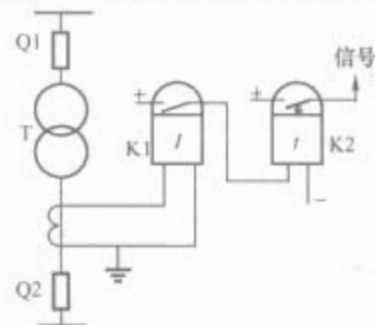


图 4.2-9 变压器过负荷保护原理图

变压器过负荷保护起动电流按下式整定

$$I_{qd} = \frac{K_k}{K_h} I_{Te}$$

式中: K_k 为可靠系数, 取 1.05; K_h 为返回系数, 取 0.85; I_{Te} 为变压器额定电流。

变压器过负荷保护的動作时限应大于过电流保护的動作时限, 以防外部短路时过负荷保护误动作。

6.3 蓄电池的保护

(1) 除柴油机起动用的蓄电池组外, 蓄电池组应设有过载和短路保护, 保护装置尽可能靠近蓄电池组。

(2) 每一蓄电池组的充电装置, 应设有由于充电装置电源电压过低或失电而防止蓄电池组放电的保护装置。

(3) 向主要设备供电的应急蓄电池组可只设短路保护。

第3章 船舶电能质量分析与控制

船舶电网电能质量不仅依赖于由发电装置所发电能的质量,而且依赖于电力负载的用电质量。前一方面主要涉及到为船舶电力系统中供电系统的应用,而且,有时还包括了发电机传动操纵对电压质量的影响。负载对船舶电网电能质量的影响主要为:①接通和关断大功率装置所引起的瞬态响应;②电力装置被误操作时的瞬态响应;③非线性负载造成的电网谐波;④不平衡负载。

实际上,在船舶电网中具有确定和随机两种特性的扰动是明显不同的。对于随机性扰动,船舶电力系统的响应由这些因素决定:电站的构造、主配电板上的负载、控制系统的特性等。然而,随机性扰动可以归因于噪声特性的干扰,例如,平衡泵、推进电动机或甲板起重机械的起动等。但这些扰动可以认为具有相当的确定性。相反,有些装置的启动或停止过程却不具有确定性,因为它们的工作过程要视控制对象的变化情况。如制冷机、压缩机或者水泵等。区分对船舶电网中电压和电流实际干扰的确定扰动和随机扰动是一项非常棘手的任务,但它们的影响可以通过一些测量参数来描述。这些参数值都是基于船舶电力系统中频率、电压、电流和功率的测量。

对于船舶电网电能质量参数的测量方法,以及相应的测量工具的研究已受到关注,尤其是带大量的电力电子设备的电力系统。对电能质量参数进行测量是对船舶电网电能质量进行改善的前提。

目前,采用电力电子技术来改善电网电能质量问题已获得长足进展。方法主要有两个:①采用滤波器,也包括有源滤波器,用来消除因大量应用电力电子器件而造成的电能质量问题,主要为对高次谐波进行滤波;②采用交流电力脉冲控制器,即设计一个通断频率比电源电压频率高得多的开关系统来得到线性化的电能调节装置,从而使得负载电压—电流特性线性化。

1 船舶电网电能质量分析方法

船舶电网一般为低压电网,目前也有采用中压电网的。船舶电网上的交流电压波形只能近似地看作正弦波。除了基波之外,还存在畸变,并且除了周期性的畸变波外,还有随机产生的畸变波。在陆上电力工业标准中,畸变波常常被称为干扰。在本书中,仅仅把电压和电流的畸变波称为干扰。图4.3-1显示了在船舶电网中所出现的干扰的实例。

1.1 船舶电网电能质量特点分析

电能质量一般被定义为描述电能传输过程特性的一套参数。这些参数描述了供电的连续性(或供电的间断性)以及电压的特性。例如,多相交流电路中的电能质量参数一般包括与额定值相比的电压偏差、电压突降、与额定值相比的电流波形的偏差,有功功率、无功功率和视在功率的畸变,电压、电流不平衡。

许多文献认为下列因素决定了电力系统中的电能质量:合适的电压值和频率,波形未畸变的供电电压,以及供电电压的平衡性。有些文献中将电能质量与供电电压质量划上了

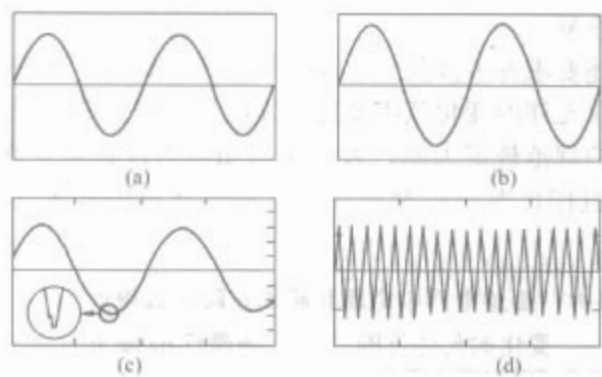


图4.3-1 船舶电网电压畸变实例

(a) 谐波干扰; (b) 谐波和谐波干扰;

(c) 瞬时干扰; (d) 短时间电压变化(上升或下降)

等号。总的来说,电能质量主要取决于电力系统的三相电压的性质,另外,还取决于负载的性质。即电能质量同时取决于电力系统中供电电压参数以及负载特性的合理性。

对于船舶电力系统,电能质量可定义为描述在各种船舶工况下(操纵工况下,海上航行时,停靠港口时)电能的生产、分配以及使用的一组参数。

1.1.1 船舶电网电能质量参数描述

描述船舶电网电能质量的一套参数包括电网中的各种电压、电流参数(有效值,频率,不平衡度,波形)以及描述供电连续性的相关参数(并联运行的发电机组之间有功与无功负载的分配)。另外,也包括动态时电压和频率的稳定性,以及无线电干扰。为确保无线电通信和无线电导航设备操作的正确性,需要限制无线电干扰。船级社有关的规范规定中提出了,不仅需要抑制对特定电气设备和电子设备的干扰,而且电气设备或电子设备产生的电磁干扰必须在允许的范围内。主要由电力电子设备产生的无线电干扰,有以下两种传输途径:通过电网电线发射和直接电磁波发射。由于上述设备都有屏蔽,故实际中无线电干扰通过直接传输的影响很小,即起决定性的是通过电网的传输。

无线电干扰所允许的值由船级社的规范来规定。船舶电网中的电能质量取决于发电机组发电的质量以及负载中电能使用的质量。这些问题是相互关联的,只有在适当假定条件下才可分开考虑。船舶电力系统中供电的电能质量不高会导致用电电能质量的下降,反之亦然。船舶电网电能质量的处理不仅是长期的(船舶使用周期)也是广范围的(电网,电站,配电板,负载)。

1.1.2 对供电质量的描述

船舶电力系统中供电的质量主要取决于发电机驱动设备类型、船舶发电机电压控制设备的特性,及其驱动单元速度调节器的特性。船舶中通常至少有3台同步发电机。每个发电机组都配有独立的电压和频率控制系统,以及独立于发动机调节器的超速调节器,可保护不超出允许的最大转速。具体要求以我国船级社《钢质海船入级规范》为例,发电机组的频率控制系统、电压控制系统必须确保如下几点:

(1) 保持转速与额定值的差值在 $\pm 5\%$ 范围内,负载在 $0 \sim 100\%$ 额定负载范围内变化。

(2) 突然卸载额定负载或者突加一半额定负载时,速度

变化不应超出发动机额定转速时的 10%，且在 5s 之内必须恢复到原转速。

(3) 保持电压在额定值的±2.5%差值范围内，负载可在 0~100%额定负载以及额定功率因素范围内变化。

(4) 运行在额定转速以及额定电压的发电机，负载的三相平衡性发生突变时，引起的电压降不能低于额定值的 20%，电压升不超过额定值的 15%，且发电机电压在 1.5s 内应该恢复。

上述要求并未涉及应急发电机电压的调节。在应急工况下，电压允许的变化范围要比主发电机稍微宽些。仍以我国船级社的规范规定为例，为确保船舶电力设备能正确工作，与额定值相比电压以及频率允许的变化范围在表 4.3-1 中列出。

表 4.3-1 船舶电网中电压和频率在额定值附近变化的允许范围 (在正确操作前提下)			
参 数	额定电压偏差		
	长持续时间	短持续时间	
	值 (%)	值 (%)	时间 (s)
电压	+6 -10	±20	1.5
频率	±5	±10	5

船上也进行了一些研究，如由 3 台发电机组组成的自动化电站，其参数为：每台发电机输出 650kVA、额定电压 450V、转速 720r/min。另外，装有 Woodward UG8 调速器以及 TUR 调压器。当有功负载在额定值 60%~100%变化时，系统中应用的转速以及电压控制系统能确保如下的过渡过程：速度调节的动态误差不超过 10%；速度调节过程的时间低于 4.45s；电压调节的动态误差不超过 14V；电压调节过程的时间低于 1.5s。

另外，电网的电压降会引起船舶电网电压其他方面的变化。根据船级社的要求，电压降不应超出（占额定电压的百分比）：①对于连接发电机和主配电板或应急配电板的电缆来说不应超出 1%；②对于连接主配电板或应急配电板和正常工作的负载电缆来说，不应超出 6%。而对于信号灯以及航海灯来说，在保证所需照明的条件下，其允许的电压降更低。对于短周期负载，如启动电动机的过程中，只要对安装的负载的允许不产生有害的影响，可允许更高一些的电压降；③对于直接启动的 AC 电机的电缆来说，不应超出 25%。

一般情况下，船舶交流发电机产生的几乎是三相正弦的平衡电压，因此对于这样的发电机来说，所产生电压波形瞬时值与基波相应值之间的差别，不应超过基波峰值的 5%（如图 4.3-2 所示），逆序分量和零序分量的值不应超过正序分量值的 2%。然而船舶实际运行中，可多次观察到这种现象：由于不平衡负载或者结构特性，会出现相电压不平衡。例如，船舶 ZAGLEBIE SIARKOWE 就出现过这种现象好几次。

各船级社都对船舶并联发电机组的有功功率及无功功率的分配进行了规定，一般要求每套发电机组的有功负载在 20%~100%额定负载范围内，其下限也可以是发电机最大额定有功输出的 15%，或者是最小额定有功输出的 25%。另外，在 20%~100%额定输出范围内变化时，允许的电流变化被限制在发电机最大输出电流的±15%范围内。

目前，并联运行的发电机，最常见的有功功率和无功功

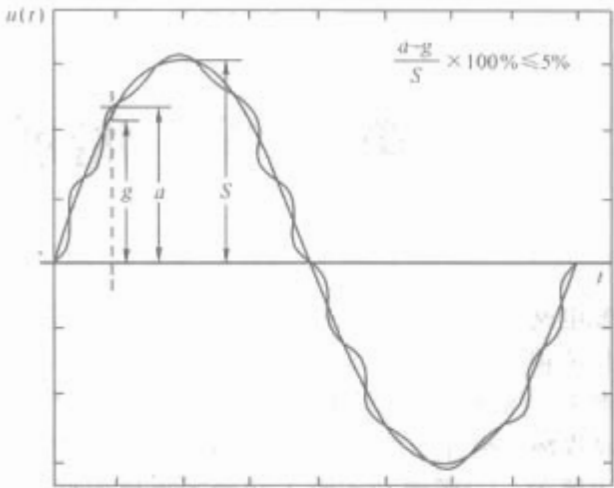


图 4.3-2 非正弦电压波形图

率的控制方法就是“静态特性法”。这种方法精度较低，但是相对简单。由于新造船舶通常的使用年限是 20 年，因此该方法在船舶电网电能质量上将来仍会有较大影响。发电机组调压器和调速器都有这样的特性，即转速和电压变化的同时，发电机组的有功功率和无功功率也分别变化，如图 4.3-3 所示。这种调节器静态特性的斜率定义为 k_s ，称为下降系数

$$k_s = \frac{W_n - W_0}{P_n} \tag{4.3-1}$$

式中： W_n 为额定负载下的控制量，也就是电压或者转速； W_0 为空载下的控制量； P_n 为额定负载，即转速控制下的有功功率，或者电压控制下的无功功率。

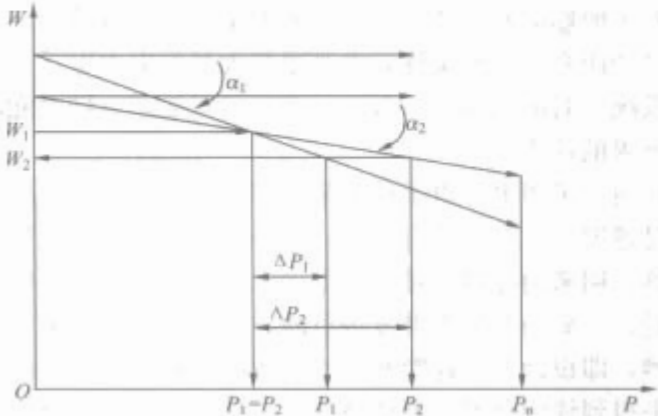


图 4.3-3 在不同的下降系数 k_{s1} 、 k_{s2} 和不同的控制量的情况下，并联运行的发电机组间的负载分配

注： $P_1 = P_2$ 。

在图 4.3-3 中，显示的是最常见的发电机组并联运行，有着不同的斜率和受控量，也就是转速和电压。负载改变之前，有功功率和无功功率的分配是平衡的。根据控制系统静态特性，通过执行器以获得均衡负载。船舶负载增加 ΔP ，引起被控量改变 $\Delta W = W_1 - W_2$ ，出现非均衡的有功功率和无功功率分配，如下式所示

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 \tag{4.3-2}$$

式中： ΔP 为船舶电站的负载增加； ΔP_1 、 ΔP_2 分别为 1 号、2 号发电机增加的负载。

由式 (4.3-1) 得

$$\Delta P_1 = \frac{\Delta W}{\tan \alpha_1} = \frac{\Delta W}{k_{s1}} \tag{4.3-3}$$

$$\Delta P_2 = \frac{\Delta W}{\tan \alpha_2} = \frac{\Delta W}{k_{s2}} \tag{4.3-4}$$

式中： ΔW 为被控量的改变； k_{s1} 、 k_{s2} 分别为 1 号、2 号发电机被控量的斜率系数。

式(4.3-2)、式(4.3-3)、式(4.3-4)经过转化可得下式

$$\Delta W = \frac{\Delta P}{\frac{1}{k_{s1}} + \frac{1}{k_{s2}}} \quad (4.3-5)$$

据此,负载分配不平衡系数 δ 由下式表示

$$\delta = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{P_n} \quad (4.3-6)$$

综合式(4.3-3)、式(4.3-4)、式(4.3-5)可得

$$\delta = \frac{\Delta P}{P_n} \times \frac{\frac{1}{k_{s2}} - \frac{1}{k_{s1}}}{\frac{1}{k_{s1}} + \frac{1}{k_{s2}}} \quad (4.3-7)$$

式中: P_n 为发电机的额定负载。

ΔW 与 δ 随着负载增加 ΔP 而变化,控制系统静态特性的倾斜角 α 变化时,描述变化的特性曲线如图4.3-4所示。

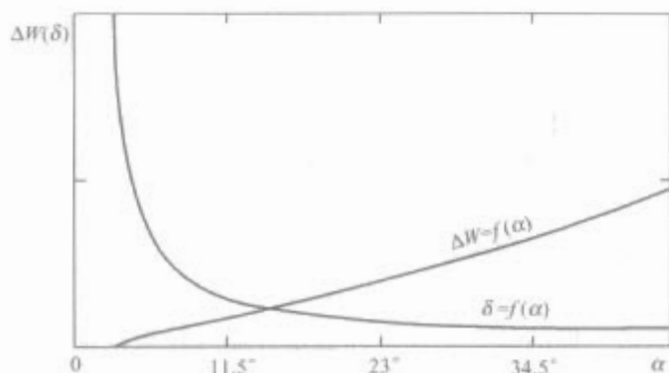


图 4.3-4 由倾斜角 α_1 和 α_2 确定发电机控制系统斜率系数的函数后, ΔW 与 δ 的变化过程特性曲线图

注: $\alpha_1=3^\circ\sim 45^\circ$,并且对应的 α_2 比 α_1 小 3° 。

由图4.3-4可看出,通过静态特性方法来确保精确调节负载分配,该条件与确保发电机组较大的斜率值有联系。斜率系数大,从上述功率分配的角度来说是有利的,但与保持船舶电网电压和频率恒定的要求相矛盾,故需要找出一个折中的办法。根据对转速调节器的研究结果,相关转速从空载运行到额定负载范围内变化,达到3%~5%额定转速,可得到有功功率分配的差别在6%~7%之间,认为这样的斜率系数是最合适的。另外需说明的是,液压机械调速器的设定斜率值过小时,会导致并联运行的发电机组相互间的负荷转移的不稳定性。但并联运行的发电机组之间的功率分配还有其他调节方法,在此不赘述。

另外,轴带发电机的应用带来了如何保持船舶电网频率恒定的问题。一般地,船级社要求作为主要电能生产源的轴带发电机,在船速不同时需产生恒定的转速。即便是装有螺距可调的推进器的船舶也不太容易实现这点。船舶电网的电能质量,还取决于不可预测的因素,如海况等。

1.1.3 对用电质量的描述

电能使用质量的概念是指负载消耗电能的一个性质,即对由同一电网供电的其他负载而言,无论是静态还是动态时都没有干扰。可以说,每个大功率负载对电网的参数有较大影响。负载对船舶电网电能质量的影响主要表现在:开关大负载引起的过渡过程;负载误操作引起的过渡过程;由于非线性负载引起电网中的高次谐波;负载不平衡。

船舶电网电压和频率的变化基本源于大负载。通常都是一些直接起动的电动机。例如,起动空气压缩机或者起动锚机的驱动电机,其额定输出功率最高可能达到单台发电机组的百分之几十,包括推进器驱动电机的额定功率也是这样。启动时吸收的大电流,除了引起发电机输出端的电压降,还会引起电缆连接处电阻的电压降。船舶电缆由于长度较短,

且船舶电网的电压较低,其电抗可忽略。

船舶电网中的电压畸变,以前主要是由配电设备和负载的投切过程,以及熔断器熔断时的过电压引起的,现在通常是由使用功率半导体变流器件引起的。电压畸变指数 k_u (通常提及的THD)以及电压基波瞬时值的最大畸变系数 u_w 决定了船舶电网的畸变情况

$$k_u = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2} / U_c \times 100\% \quad (4.3-8)$$

式中: U_h 为第 h 次电压谐波的有效值; U_c 为整个电压过程的有效值。

$$u_w = \frac{\Delta U_m}{\sqrt{2}U_1} \times 100\% \quad (4.3-9)$$

式中: ΔU_m 为电压畸变的最大值; U_1 为基波电压的有效值。

大多数船级社要求电压畸变指数 k_u 不应大于10%,而俄罗斯船级社和波兰船级社还规定了电压基波瞬时值的最大畸变系数 u_w 应不超过30%,如图4.3-5所示。

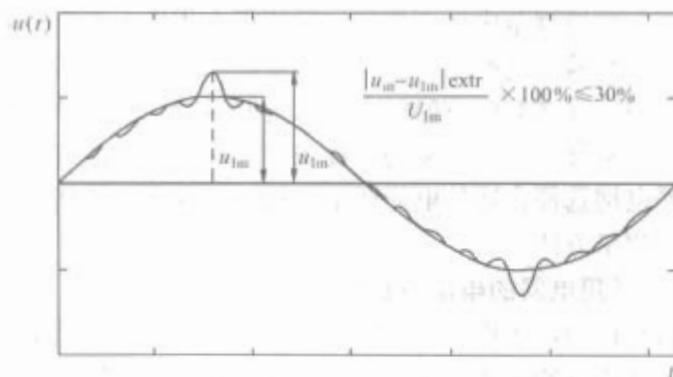


图 4.3-5 $u_w=30\%$ 和 $k_u=9.95\%$ 时的信号波形图

对于船舶电网的无线电干扰,应确保电力电子设备能够抵御电力系统中出现的下列常规干扰:

(1) 供电电路以及接地电路中,振幅2kV的脉冲,ns级脉冲干扰;控制电路和信号电路中1kV的脉冲;对于每种脉冲极性的5min的测试周期[其中,所采用的脉冲为上升时间/脉冲宽度=5/50(ns/ns)]。

(2) 供电电路以及接地电路中,1kV脉冲振幅的高能脉冲干扰;控制电路和信号电路中0.5kV的脉冲;对于每种脉冲极性5min的测试周期[其中,所采用的脉冲为上升时间/脉冲宽度=1.2/50(μs/μs)]。

(3) 频带宽度在150kHz~80MHz之间的高频干扰,信号的振幅有效值为3V。

(4) 实施频带宽度在0.05~10kHz之间的低频干扰,其相应的电压测试水平为直到15次谐波为止,采用额定供电电压有效值的10%,从100次谐波~200次谐波,采用额定供电电压有效值的1%。

1.1.4 电能质量评估

电能质量是不能进行直接测量的。然而,对决定电能质量的相关量值可以作详细规定,描述这些量的变化可归因于一些适当定义的可测量的参数指标。因此,尽管很难说出直接测量电能质量的方法,但是可通过描述电压和频率的变化,电压和电流的畸变,相间电压的不平衡,有功功率和无功功率的分配比例,产生和吸收的干扰水平,间接得到评估。若适当定义这些指标并长期跟踪测量,便可在被控系统中评估电能质量。电能质量指标可分为应用于陆上电力系统的基础量,以及有船舶电力系统特色的补充量。

对于这些指标,除了那些在陆上电力行业已经被广泛接

受和受到控制的指标外,需要特殊的测量仪器来测定。例如借助设计合理,有编程功能的电能质量分析仪等。国际海事组织(IMO)收集的海船运行故障的记录表明,对船舶电网的电能质量问题应当采用新的方法解决,并应开发电能质量方面的测量设备。对许多船舶故障运行的调查表明故障通常由电能质量短期或者长期的恶化引起。

1.2 船舶电网电能质量指标

为了电力系统安全、高效地运行,借助可测量的,且能用于诊断的特性指标来描述电能质量特征是有必要的。这些指标定义了电能质量参数偏离其标准值的允许偏差,在电能的生产、传输、使用中都要用到。

船舶电网必然受到各种干扰,这些干扰引起了电压、频率偏离其额定值,以及网络中电压、电流波形出现畸变。负载的大幅变化,单个负载和电站的额定输出之间比例的不理想,船舶电力系统中半导体变流器的日益增多,这些问题发生在船舶电力系统中要远比在陆上电力系统中来得严重。由于问题的重要性,某些方面已经在一些船级社颁布的远洋船舶入级与建造规范中做了规定,但这很大程度上取决于对船舶操纵的经验。这些法律文件只能解决问题的一小部分,而且还不包括许多对影响船舶电力系统的运行,或有助于船舶电网提供良好的电能质量的必要条件的说明。因此有必要针对船舶电网选择合适的电能质量指标,并就所选的指标开发相应的测量方法。

1.2.1 通用电网的电能质量指标

通常认为,多相交流电网向负载提供较高电能质量的条件之一是正弦的平衡电压,有效值和频率适当且恒定。实际上,与上述理想要求相比,整个电网或者其中的一部分,都存在着或大或小的偏差值。出现这些偏差与下列情形相关:电压、电流波形不平衡、畸变,电压、电流的有效值和频率发生变化,供电不连续,噪声以及无功电流。电力系统中供电质量不佳以及负载质量不高导致了这些干扰的产生。值得一提的是,提到供电质量时不能和负载质量割裂开来考虑,反之亦然。概括而言,描述电能特征与性质的参数,即电压,电流,功率等,决定了电能质量的好坏。电能质量指标一般可以分为几组:描述电流和电压波形的指标、描述电流和电压偏离额定值的指标、确定功率畸变以及电压和电流不平衡度的指标。

1.2.1.1 波形与畸变的指标

波形指标为电压有效值 U 与平均值 U_{av} 的比率,即

$$k_k = \frac{U}{U_{av}} \quad (4.3-10)$$

峰值指标(系数),等于电压峰值 U_m 与有效值 U 的比率,即

$$k_{sz} = \frac{U_m}{U} \quad (4.3-11)$$

非正弦率系数,等于基波的有效值 U_1 与整个信号有效值的比率,即

$$k_n = \frac{U_1}{\sqrt{U_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}} \quad (4.3-12)$$

还有一个描述电压与电流波形的重要指标是电压畸变系数,定义为测试信号高次谐波的有效值与基波有效值 U_1 的比率,即

$$k'_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (4.3-13)$$

有时,电压畸变系数定义为与整个信号有效值 U_c 的比率

$$k''_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{\sqrt{U_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_c} \quad (4.3-14)$$

式(4.3-13)与式(4.3-14)描述的指标通常由 THD(总谐波畸变系数)来代表。

一般地,对总谐波畸变系数,描述如下

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} A_h^2}}{A_c} \quad (4.3-15)$$

式中: K_u 为电压畸变系数,等于总的谐波畸变系数 THD; A_h 为 h 次谐波的有效值; A_c 为整个波形的有效值(原始信号)。

也可以百分制表示

$$k_u = k_u \times 100\% \quad (4.3-16)$$

值得一提的是,上述解释也是各船级社规范推荐的。例如,由式(4.3-14)描述的电压畸变系数 k''_u ,假设按照劳氏船级社的规范规定,电压谐波畸变系数由 1~50 次的谐波(包括 1 次和 50 次)决定,关系式(4.3-15)可表述如下

$$k_{50} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} U_h^2}}{U_{rms}} \times 100\% \quad (4.3-17)$$

式中: U_h 为 h 次谐波的有效值; U_{rms} 为电压的有效值。

式(4.3-17)有时也称为 TDF(总畸变因素)。 k_{50} 中的下标“50”代表式(4.3-17)中各次谐波求和的谐波次数的上限。需强调的是,陆上电网的相关标准设定求和的上限值为 40,也就是说电压畸变系数需要由直到 40 次的谐波来决定。然而,船舶电网的调查结果证明,次数超过 40 次的谐波影响有时也会很重要。例如,有实船电网中发现 49 次谐波的有效值超出了总有效值的 1%。因此,出现在式(4.3-17)中的谐波次数高达 50 次是合理的。

为了评估直接由主配电板供电的负载的电流波形,可以利用辅助的加权谐波畸变系数 k_w 来表述

$$k_w = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_n} \times 100\% \quad (4.3-18)$$

式中: I_1 为电流基波的有效值; I_{rms} 为电流总有效值; I_n 为指定线路中电流的额定值(子系统中)。

按照式(4.3-18),高次谐波涉及到额定(有效值)电流都是“加权的”。采用加权谐波畸变系数 k_w ,使得评估线性负载电流波形对电能质量的影响更加便利、快捷。若不采用其他测量方式,系统中电压对电能质量影响的评估更为方便。

与畸变电压电流波形相关的参数还有畸变因数 k_d ,定义为波形中所包含的高次谐波的峰值与基波幅值的比率

$$k_d = \frac{|u_2(t) + u_3(t) + u_4(t) \cdots|_m}{\sqrt{2}U_1} \quad (4.3-19)$$

电流波形中特定高次谐波所占份额因数 k_{th} ,也与电压电流波形的形状有关,定义为 h 次谐波与基波的比率

$$k_{th} = \frac{I_h}{I_1} \quad (4.3-20)$$

1.2.1.2 电压及频率值变化的指标

描述电压与频率值偏离其额定值的指标,由负载终端值与额定值之间的差异来决定。电压偏差 ΔU 可由下式表示

$$\Delta U = U - U_n \quad (4.3-21)$$

式中: U 为负载电压的有效值; U_n 为电压额定值(有效值)。

或者是以百分数形式来表述

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U_n} \times 100\% = \frac{U - U_n}{U_n} \times 100\% \quad (4.3-22)$$

对于频率,可以用同样的方式来表述

$$\Delta f = f - f_n \quad (4.3-23)$$

式中: f 为负载终端的电压频率; f_n 为额定频率值。

也可用百分数形式来表述

$$\delta f = \frac{\Delta f}{f_n} \times 100\% = \frac{f - f_n}{f_n} \times 100\% \quad (4.3-24)$$

电网中出现的电压变化,取决于电压变化幅值 ΔU^* 或者是一组电压的幅值变化,或者表述这一特性的其他参数,如电压频率变化系数 f_v 。电压变化幅值表示如下

$$\Delta U^* = U_{\text{eks1}} - U_{\text{eks2}} \quad (4.3-25)$$

也可以百分数形式表示

$$\delta U^* = \frac{\Delta U^*}{U_n} \times 100\% = \frac{U_{\text{eks1}} - U_{\text{eks2}}}{U_n} \times 100\% \quad (4.3-26)$$

式中: U_{eks1} 、 U_{eks2} 为电压随时间变化过程中的相邻极限有效值,其相对速率较高,例如每秒超过了1%。

电压频率变化系数 f_v ,定义为电压幅值变化量 m_v 与变化发生的时间 T_v 的比率

$$f_v = \frac{m_v}{T_v} \quad (4.3-27)$$

电压能量变化量 D_v 也是 T_v 时间内电压变化的特征之一,定义为

$$D_v = \int_0^{T_v} \delta U^* dt \quad (4.3-28)$$

同理也可以定义频率变化,取决于频率变化幅值 Δf^* 或者是一组频率幅值的变化,或者是其他特性以及发生频率 f_f

$$\Delta f^* = f_{\text{eks1}} - f_{\text{eks2}} \quad (4.3-29)$$

也可以百分数形式表示

$$\delta f^* = \frac{\Delta f^*}{f_n} \times 100\% = \frac{f_{\text{eks1}} - f_{\text{eks2}}}{f_n} \times 100\% \quad (4.3-30)$$

式中: f_{eks1} 、 f_{eks2} 为频率随时间变化过程中的相邻极限有效值,其相对速率较高,例如每秒超过了0.2Hz。

频率变化频率 f_f ,定义为频率值变化量 m_f 与变化发生的时间 T_f 的比率

$$f_f = \frac{m_f}{T_f} \quad (4.3-31)$$

有一组指标用于描述电压突降,电压骤降,电压脉冲等。电压突降,即电压在经历了较大下降值之后回到或接近正常值,一般在数个电压周期到几十秒的时间内。相应指标描述如下。

电压降的深度 δU_z^*

$$\delta U_z^* = \frac{U_{\min} - U_n}{U_n} \times 100\% \quad (4.3-32)$$

式中: U_{\min} 代表电压在突降过程中的最低有效值。

电压骤降,即瞬时值剧烈的变化,可通过电压骤降系数 k_z 来描述,即瞬时电压变化值(电压纵向骤降) ΔU_z 与供

电电压的瞬时值 U_z 的比率

$$k_z = \frac{\Delta U_z}{U_z} \quad (4.3-33)$$

电压脉冲,即电压回到或者接近初始值之后,电压瞬时值突然超调,在几微秒到几十毫秒时间内。对该值的描述有:脉冲电压,即电压脉冲瞬时最大值;电压脉冲幅值,即电压脉冲瞬间,脉冲电压值与基波瞬时电压值的差值;电压脉冲持续时间。

另外,下述指标也用于描述瞬态过程中电能质量的扰动:瞬时扰动幅值 A_z ;扰动能量 E_z ;扰动持续时间 Δt 。

瞬时扰动幅值可定义为最大扰动电压 U_{\max} 与最小扰动电压 U_{\min} 的差值

$$A_z = U_{\max} - U_{\min} \quad (4.3-34)$$

扰动持续时间 Δt 定义为扰动电压值超出预设限定值的时间。然而,用持续时间以及最大值来评定电压扰动是不够的,若考虑到扰动对电力负载,尤其是电子设备运行的影响,扰动能量也是一个重要方面。假定有个信号 $x(t)$,其能量为

$$E_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt \quad (4.3-35)$$

但对于一个数字化的瞬态信号来说,关系式如下

$$E_z = \frac{1}{f_p} \sum_{k=t_p}^{t_k} (a_k)^2 \quad (4.3-36)$$

式中: a_k 为瞬时扰动的第 k 次采样; f_p 为采样频率; t_p 为扰动起始瞬间(第一次采样); t_k 为扰动结束瞬间(最后一次采样)。

1.2.1.3 功率畸变的指标

基波功率是分析功率畸变的参考量。下面列举出描述功率畸变的一些指标:有功功率畸变系数 W_p ,定义为高次谐波的有功功率 P_h 与基波有功功率 P_1 的比率

$$W_p = \frac{P_h}{P_1} = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (4.3-37)$$

而无功功率畸变系数 W_q ,定义为 Q_d 与基波的无功功率 Q_1 的比率,其中 Q_d 取决高次谐波无功功率以及畸变功率

$$W_q = \frac{Q_d}{Q_1} \quad (4.3-38)$$

式中: Q_d 为取决于高次谐波无功功率 Q_h 以及畸变功率; Q_1 为基波无功功率。

$$Q_d = \sqrt{Q_h^2 + D^2} \quad (4.3-39)$$

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (4.3-40)$$

另外,视在功率畸变系数 W_s ,定义为高次谐波的视在功率 S_h 与基波视在功率 S_1 的比率

$$W_s = \frac{S_h}{S_1} \quad (4.3-41)$$

式中: S_h 为高次电压、电流谐波的视在功率; S_1 为基波视在功率。

$$S_h = \sqrt{(U I)^2 - S_1^2} \quad (4.3-42)$$

$$S_1 = U_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (4.3-43)$$

还有其他指标,例如输入功率利用系数,系统储存功率利用系数,以及描述功率振荡的指标。这些不仅给出了功率畸变的信息,也提供了电力系统中功率的流通状况。

另外,下列指标有助于对电力系统中电能质量的初步评估,尤其是对电网电压畸变的评估以及对于系统中其他设备

运行的影响

$$k = \frac{\cos\varphi}{\lambda} \quad (4.3-44)$$

$$\lambda_E = \frac{P_1}{S} = \lambda P_1 / P \quad (4.3-45)$$

式中: P_1 为由电压电流基波分量, 传递到负载的有功功率; P 为传递给负载的总的有功功率。

式(4.3-44)定义的系数 k 可用于对出现高次谐波的系统, 尤其是三相电力系统, 进行能量的评估。通过式(4.3-45)定义的系数 λ_E , 不仅可得知负载畸变的能量效应, 而且还可获知畸变对于实际的电能变换为机械能过程中存在的影响。

1.2.1.4 电压电流不平衡指标

电压电流不平衡指标, 根据对称的正序、逆序和零序分量, 如下所示

$$\alpha_2 = \frac{A_2}{A_1} \quad (4.3-46)$$

或者以百分制形式

$$\alpha_2^* = \alpha_2 \times 100\% \quad (4.3-47)$$

$$\alpha_0 = \frac{A_0}{A_1} \quad (4.3-48)$$

或者以百分制形式

$$\alpha_0^* = \alpha_0 \times 100\% \quad (4.3-49)$$

式中: A_0 、 A_1 、 A_2 为分别为三相电力系统中相电压或线电压、线电流的零序, 正序, 逆序对称分量的有效值。

属于同一类型的另一指标为电压不平衡系数 W_n , 定义为偏离平均电压的最大电压偏差量 Δu 与平均电压 U_{av} 的比率

$$W_n = \frac{\Delta u}{U_{av}} \quad (4.3-50)$$

式中: U_{av} 为相电压有效值的算术平均值。

根据国际电工委员会的规定(在 IEC 报告 892/1987 中给出), 若电压不平衡超出 5%, 则必须对电动机运行进行电压对称逆序分量的分析。对于轻微电压不平衡, 根据电压不平衡情况降低电动机负载。

1.2.2 船舶电网电能质量指标

在船舶电网中, 许多描述电能质量的指标, 不仅体现了船舶电网的特殊性质, 而且体现出了电能质量概念的复杂性。特别是涉及船舶系统安全运行的, 如航行、推进或者无线电通信, 是电能质量指标选择时首先要考虑的, 在船级社的相关规范规定中有相应说明。另外, 所选用指标的应用简便性, 经济性等因素, 包括对船舶电力系统的故障状态的诊断性均在考虑之列。

尽管不同的船舶电力系统有许多相似之处, 但船舶电站的组成以及所安装的负载, 都能体现出明显的个性特征。为了使船舶系统更经济地运行而采用的新技术, 通常会使得该系统的电能质量变得更差。船舶电力系统中, 除了经常出现的电压和频率的偏差值较大, 还有电压和电流波形畸变。因此, 有必要选择一组适用于船舶电网的、通用的电能质量指标。在选择船舶电网的电能质量指标体系时, 必须基于一个假设条件, 即电力系统中有关电能的产生和使用均运用了当前的新型技术方案。另外, 所选的指标应能明确地指出电压、电流波形畸变情况。电压、频率在静态和动态时, 相比额定值的偏差。还应考虑相电压不平衡时的情况以及并联运行的发电机组之间的负载分配。

1.2.2.1 描述电压、电流波形畸变的系数

由式(4.3-8)、式(4.3-15)和式(4.3-16)定义的电

压畸变系数 k_u , 以及式(4.3-9)定义的最大电压偏差系数 u_w , 均可作为船舶电力系统中电压波形畸变的指标。但有必要在相对长时间内测量电压畸变系数 k_u 的平均值。因为电动机、变压器、仪器或者用来改善功率因数的电容器所产生的高次谐波电流会导致额外的能量损失。

式(4.3-20)定义的高次谐波各次谐波含量 k_{nh} 也需要测量, 因为在船舶条件下电磁干扰主要通过供电电网传输。根据所采用的测量方法, 可以测得整个电压、电流信号的频谱, 或者根据含在给定系统中的设备数量和种类, 可测得所选择的谐波的频谱。例如在含有电力电子变流器的电力系统中, 下式所描述的供电电流谐波占据了主要地位

$$h = kp \pm 1 \quad (4.3-51)$$

式中: h 为谐波次数; $k=1, 2, 3, \dots$ 为自然数; p 为变流器的脉冲数。

当将畸变的电流供给变流器, 将使得船舶电网电压畸变。实际上, 直到 25 次的奇次谐波中, 3 的倍数的谐波是关键。

1.2.2.2 描述电压、电流与额定值的偏差, 以及相间电压不平衡的系数

船舶电网中, 描述静态和动态时电压与额定值偏差的指标有: 电压偏差 δU , 频率偏差 δf 。电压、频率与额定值的偏差应该在静态和动态时都加以考虑。

动态时, 应测定瞬时状态持续的时间, 例如, 对于配有 TUR 调压器系统和 Woodward UG8 调速器的 650kVA 的发电机组来说, 电压瞬时状态持续时间会达到 1s, 而频率会达到 4.45s。瞬态的电能质量评估则可以采用已定义的 A_z 、 E_z 、 Δt 。

式(4.3-50)定义的电压不平衡系数 W_n 可作为描述电压不平衡的指标。另外, 还需要考虑对船舶电网中出现的电压脉冲进行控制的有效性。

1.2.2.3 描述并联运行发电机组的有功功率和无功功率分配

描述并联运行发电机组有功功率和无功功率分配的参数, 对于船舶电力系统供电的连续性很重要, 这是为了船舶运行的安全性, 但在陆上电力行业中未曾使用过。并联运行发电机的负载分配系数, 对第 i 台发电机的有功功率 δP_i 和第 i 台发电机的无功功率 δQ_i 的定义如下

$$\delta P_i = \frac{P_i - \alpha_i \sum_{i=1}^r P_i}{P_n} \times 100\% \quad (4.3-52)$$

$$\delta Q_i = \frac{Q_i - \alpha_i \sum_{i=1}^r Q_i}{Q_n} \times 100\% \quad (4.3-53)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为第 i 台发电机的有功负载和无功负载; P_n 、 Q_n 分别为并联运行发电机组中输出功率最大的发电机的额定有功负载和额定无功负载, 或者是额定有功负载和无功负载分别低于上述发电机组中输出功率最大的发电机的额定有功负载的 0.6 和额定无功负载的 0.4 的发电机的额定有功负载和额定无功负载; r 为并联运行的发电机台数, α_i 为比例系数, 取决于并联运行的发电机数量及其输出 ($r=2$ 时, $\alpha_i=0.5$, 即共同工作的发电机的输出相同)。

系数 δP_i 和 δQ_i 在静态时和动态时都需要测量, 原因是并联运行发电机组有功负载和无功负载的分配比例对于确保船舶电力系统的连续供电以及船舶的运行安全, 都非常重要。

1.2.2.4 其他指标

对于船舶电力系统，由于其电网特性较“软”以及这样系统中单个发电机组电压及转速（频率）控制系统的独立性，出现了 U/f 比率与额定值较大的偏差，从而导致了变压器和电机中磁通量剧烈变化。因此，采用了其他描述 U/f 比率变化的指标，与这些量额定值的比率有关，即

$$\delta(U/f) = \frac{U/f - U_n/f_n}{U_n/f_n} \times 100\% \quad (4.3-54)$$

对该指标的测量，有必要使测量的平均时间相对较长，因为其对包含磁路的设备的总损失有影响。

另外，出于经济性考虑，式（4.3-37）定义的有功功率畸变系数 W_p 可用来说明船舶电力系统的电能质量，因为基波电压和电流谐波产生的功率对许多设备（如电动机）的运行影响极大。

1.2.2.5 船级社的规定中有关，描述船舶电力系统电能质量的指标

在表4.3-2中，以我国船级社《钢质海船入级规范》为例，列出了船舶电网的电能质量指标及其限制值。表中一些指标的限制条件的缺失，意味着电能质量的相关指标未在该船级社的规定中定义。值得一提的是，为了船舶电力系统中电能质量的评估，大多数主要的船级社均规定了类似的指标，主要区别在于限制值，如表4.3-3所示。

表 4.3-2 船舶电网电能质量指标和及其限制值

指 标	限制值
电压畸变指标 k_u	5%
电压瞬时偏移基波的偏移量系数 u_w	—
特定高次谐波所占份额因数 K_{th}	—
电压平均畸变 k_{av}	—
电压静态偏差 δU	-10%和+6%
频率静态偏差 δf	±5%
电压动态偏差 δU_d	-20%和20%在1.5s内
频率动态偏差 δf_d	±10%在5s内
电压平均偏差 δU_{av}	—
频率平均偏差 δf_{av}	—
有功功率静态分配系数 δP_i	15%或者25%
无功功率静态分配系数 δQ_i	10%或者25%
有功功率动态分配系数 δP_{id}	—
无功功率动态分配系数 δQ_{id}	—
电压不平衡系数 W_n	—
电压频率比平均偏移系数 $\delta(U/f)_{av}$	—
有功功率畸变系数 W_p	—

表 4.3-3 船舶电力系统电能质量指标的对照

	IACS	LR	DNV	NKK	ABS	RS
THD(%)	②	8	5 10①	③	5②	10
u_w (%)	—	—	—	—	—	30
δU (%)	+6, -10	+6, -10	+6, -10	+6, -10	+6, -10	+6, -10
δf (%)	±5	±5	±5	±5	±5	±5

续表

	IACS	LR	DNV	NKK	ABS	RS
δU_d (%)	±20	±20, -15	±20, -15	±20	±20	±20
δf_d (%) $t=1,5s$	±10	±10	±10	±10	+10	±10
δP_i (%) $t=5s$	—	15/25	15/25	15/25	15/25	15/25
δQ_i (%)	—	5	10/25	10/25	10/25	10/25

- ① 适用于有电力电子变流器的系统。
- ② 仍在讨论中。
- ③ 目前数据缺乏。

表4.3-3中符合的含义如下：

IACS——国际船级社协会。

LR——劳氏船级社。

DNV——挪威船级社。

NKK——日本海事协会（船级社）。

ABS——美国船级社。

RS——俄罗斯船级社。

THD——电压总谐波畸变系数。

u_w ——电压值与基波的瞬时偏差系数。

$\delta U(\delta U_d)$ ——分别为电压静态(动态)偏差系数。

$\delta P_i(\delta Q_i)$ ——分别为静态时有功(无功)功率分配系数。

t ——电压、频率短时偏差的持续时间。

表4.3-2和表4.3-3显示了静态和动态时，电压、频率允许的偏差值，从中可以看出各项能确保负载正确运行的限制值，然而对发电机组类似的要求更加严厉，如要求 $\delta U = \pm 2.5\%$ 。

值得一提的是，由上述各船级社规定的大多数指标，阐明了“安装在船舶电力系统中负载的要求”($\delta U, \delta f, \delta U_d, \delta f_d$)。这些要求体现了供电电压畸变的允许程度(k_u, u_w)，以及并联运行的发电机组的测量条件($\delta P_i, \delta Q_i$)。另外，这些船级社也提出了处理电磁兼容测试的相关要求，如电能控制和使用仪器设备，电脑以及外围设备（如射频、辐射、快速瞬态过程、慢速瞬态过程）。

另外，可以观察到表中缺少对供电电压不平衡的要求。

1.2.2.6 船舶电力系统中电能质量的综合指标及其应用的可行性

电能质量可以理解为描述电能产生，分配，使用过程中的一组参数。电能质量的恶化使得系统中主要部件的故障风险增加，且其运行的经济效益降低。正确评估电能质量是一个复杂的问题，需要了解其恶化的因果关系。电能质量一个典型的评估方法就是对比其电流等的值及其限制值（也即描述特定电力参数与额定值偏差的量）。但是，许多情况下需要考虑电力系统中的负载和干扰的相互作用。为此，有必要设计新的电能质量评估方法，其本质是电能质量评估过程的算法化。借助基本参变量的中间值，经过主配电板汇流排上三相供电电压向量瞬时值的两级处理过程，成为电能质量的信息。第一级处理的是上述基本参量 [$W_n, \delta(U/f), K_u$]；第二级，新的电能质量综合指标，成为测量数据的综合值。

电力系统中典型的设备是电动机，其数量众多，也是电力系统中的重要设备。电能质量指标的定义就考虑到了电能质量的降低对于电动机运行的影响。例如，若供应给电动机的电压是畸变的、不平衡的、频率和有效值是可变的，那么

会引起额外的多种能量的累加损失。为此,设计电能质量新的、综合性指标时,应考虑供电电压参数的指标,并把这些参数指标取平均值。因此定义综合电能质量指标时,作了如下假设。

(1) 描述综合指标 C_s 的数学式应基于船舶电站主汇流排上三相供电电压的一些特征值,即 W_n 、 $\delta(U/f)$ 、 k_u 。

(2) 用于描述这些指标的数学式,应能确保体现足够的灵敏度,即使对于受影响的量的微小变化。

(3) 在达到或者超出任意一个基本量指标 $[W_n$ 、 $\delta(U/f)$ 、 $k_u]$ 的允许值时, C_s 应等于 0, 当基本量指标在其允许范围内时, C_s 应满足不等式 $0 < C_s < 1$; 若 $C_s = 1$, 则获得了最佳电能质量, 这就是说基本量的指标为 0。

(4) 描述综合指标的数学式, 为了在图形环境中可以清楚地呈现出来, 应该能方便地在选定的坐标系中得以清楚地阐述。

所提出的综合指标 C_s 是一个有 3 个变量 $[W_n$ 、 $\delta(U/f)$ 、 $k_u]$ 的函数, 可以想象最简单的情形, 图 4.3-6 所示的三维立体图中, 用图表示了其数值。

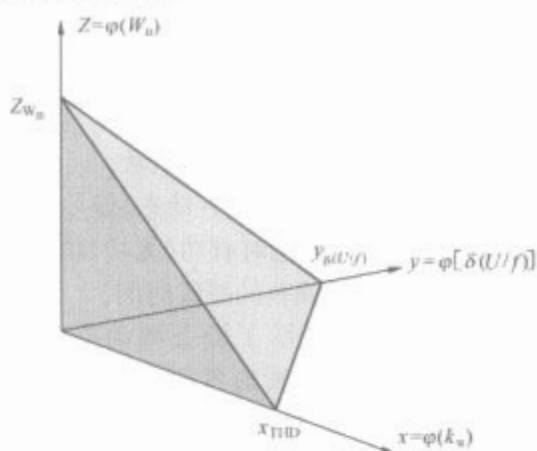


图 4.3-6 综合电能质量指标参数立体图

于是, 综合指标值可由下式表示

$$C_s = x_{k_u} y_{\delta(U/f)} z_{W_n} \quad (4.3-55)$$

三维立体图中将这些值标准化, 得 $V_{xyz} = 1$ (相当于 $C_s = 1$), 若假设棱长 x 、 y 、 z 相等, 可分别获得

$$x_{k_u} = y_{\delta(U/f)} = z_{W_n} = \sqrt[3]{6} \quad (4.3-56)$$

而当 $0 < C_s < 1$ 时, 棱锥的三条棱长可分别由下列各式计算得出

$$x_{THD} = \sqrt[3]{6} \times [1 - (m_{k_u} \overline{k_u} k_u)] \quad (4.3-57)$$

$$y_{\delta(U/f)} = \sqrt[3]{6} \times [1 - (m_{(U/f)} \overline{\delta(U/f)} k_{(U/f)})] \quad (4.3-58)$$

$$z_{W_n} = \sqrt[3]{6} \times [1 - (m_{W_n} |W_n| k_{W_n})] \quad (4.3-59)$$

式中: $|W_n|$ 、 $\overline{\delta(U/f)}$ 、 $\overline{k_u}$ 为基本量指标的平均值; m_{W_n} 、 $m_{(U/f)}$ 、 m_{k_u} 取决于基础指标 w_n 、 $\delta(U/f)$ 、 k_u 限制值的系数; k_{W_n} 、 $k_{(U/f)}$ 、 k_{k_u} 取决于综合指标特性 $C_s = \varphi(x_{k_u}, y_{\delta(U/f)}, z_{W_n})$ 要求的系数。

根据最优电能质量的定义及其标准, 随着基本量指标允许值的降低, 系数 m_{W_n} 、 $m_{(U/f)}$ 、 m_{k_u} 也降低了。

若认为电动机是船舶电网中主要的负载, 通过测量电动机绕组的等温

曲面, 可根据经验得出系数 k_{W_n} 、 $k_{(U/f)}$ 、 k_{k_u} 的值, 作用于所选的三个基本指标, 即 W_n 、 $\delta(U/f)$ 、 k_u 。

总之, 综合指标 C_s 等于 0, 意味着至少有一项基本指标超出允许值。其他情况下, 综合指标是电动机运行效率及经济性的一种度量方法, 该值越低, 电动机中的电能损失越大, 耐用性就越差。

2 船舶电网电能质量参数的测量

目前, 船舶电力系统参数的测量方法, 主要涉及到汇流排上的电压和频率, 以及发电机组的电流和其他输出。测量过程通常由对电流和电压波形的畸变较敏感的测量仪器完成, 这导致了较大的测量误差。因此, 相对于间接测量有效值的方法, 采用变送器直接测量的方法已越来越普遍了。值得一提的是, 尽管电压和电流波形的畸变目前还没有完全得以控制, 电压和频率与各自额定值的瞬时偏差还不能进行有效地记录, 但这些参数均已出现在了一些船级社的规范规定中。

首先, 应该在主汇流排、发电机组以及连接主汇流排和发电机组的汇流排上进行船舶电网供电电压质量指标的测量。然而, 在船舶电网的各个部分实行这样的测量, 在经济上并不合理。但是, 应周期性地对供电给非线性负载的汇流排和无线电通信以及导航设备的汇流排进行电能质量参数的检测, 包括在主汇流排上相关指标发生了下降之后也需要进行这样的检测。这种周期性的检测, 需要采用便携式的测量仪器。例如, Chauvin Arnoux 公司生产的钳形仪表, 用来测量真实的有效值以及谐波含量, 或者更高端的便携式电网运行分析仪如 Unipower 公司生产的 ANAPS 或 Unilyzer802。此外, 还有其他公司提供的分析仪, 如 Yokogawa 公司的 WT2010、Covert 公司的 AR5。

对电能质量指标的测量, 既可以采用模拟技术, 也可以采用数字技术。若有关被测量处理的数学方法是基于模拟技术的, 这就意味着采用了模拟测量方法。反之, 若模拟信号在设备输入阶段就已经转换为数字信号, 进一步的处理便使用数字方法, 则说明使用了数字测量方法。不管采用何种测量方式, 测量系统必须符合船用条件。船舶电气测量系统如图 4.3-7 所示。

2.1 电力系统电能质量参数的测量方法

船舶电力系统的频带使得模拟测量技术不适用于船舶电网参数测量, 主要原因有两点。

(1) 用于中低频率的窄带滤波器的研制问题。

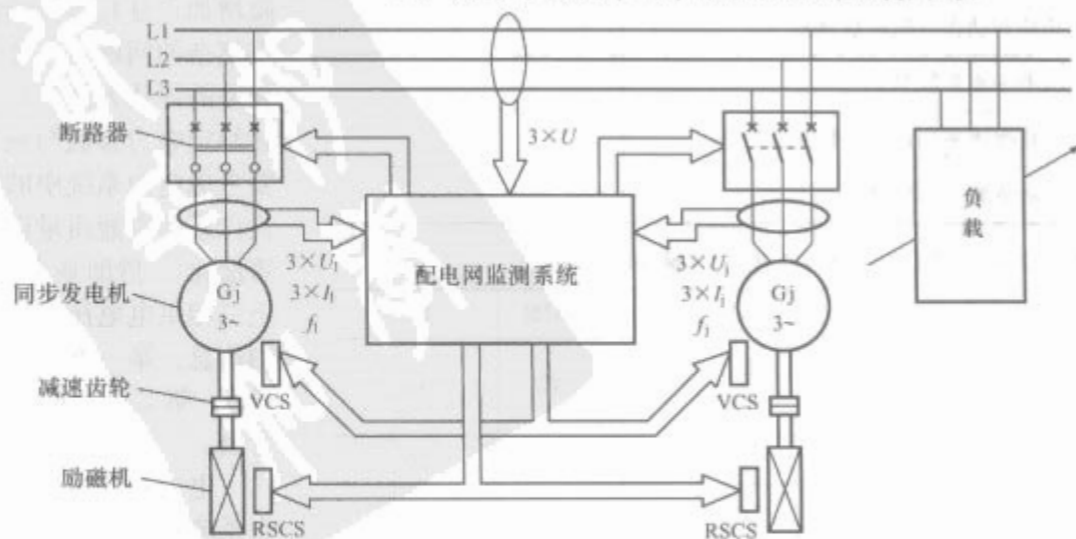


图 4.3-7 船舶电网电能质量参数综合测量系统示意图

VCS—电压调节系统; RSCS—转速控制系统

(2) 大多数船舶系统的时间常数较大。故以后数字测量技术将成为关键。这也与微处理技术的快速发展以及微处理系统价格快速下降的趋势有关。另外,算法的不断发展以及系统运行速度的持续上升,使得对参数的实时测量技术得以改进,同样起到重要作用。当然,在许多情况下,运用模拟技术对基本的电能质量参数进行测量是完全可行的。

2.1.1 模拟量系统

非正弦波形的电压、电流以及功率的有效值的测量,目前有许多模拟测量方法。测量变换器的组成中包括实现平方,积分,乘法,求和等数学运算功能单元,这些功能单元是测量系统所必需的。系统中使用的功能单元,可方便地用来测量涉及电能质量定义的一些指标。这样根据特定用途就可以选出最少的一组电能质量参数进行控制。另外,除了传统受控参数,如电压,频率,电流和功率,有必要引入一个描述船舶电网主汇流排上电压波形畸变的指标。船舶电网的电压畸变,由系数 k_u 决定(THD),通常超出5%,甚至达到20%。相对简化的对电压畸变的测量对于船舶电力系统经济和安全地运行意义重大,因为船舶电力系统中产生的电能质量都离不开对该指标的评估。在自动化系统的运行过程中,电压畸变有时会产生随机误差。这主要出现在船舶电力系统在运行时必然会出现的电压和频率变化的动态过程中。

2.1.1.1 信号畸变系数模拟式仪表

有多种模拟系统可用来测量畸变系数,陆上电网用得较多的有图4.3-8所示的畸变测量系统框图。

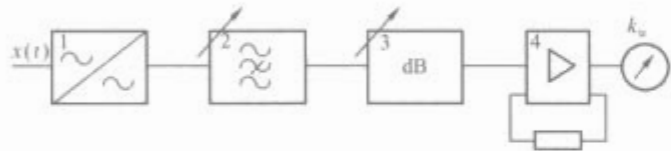


图 4.3-8 畸变测量系统框图

1—输入系统; 2—带阻滤波器; 3—衰减器; 4—负反馈放大器

根据图4.3-8所示框图,系数 k_u 的值可分两步测量而得,而非直接连续测得。

通过衰减器3,系统测量信号转换为有效值,从而可得 k_u 指示的最大偏差值。接着,通过带阻滤波器2,消除了基波信号,从而可得 k_u 指示的最小偏差值。 k_u 指示的偏差即为测量信号的畸变。该系统不仅测量过程复杂,而且信号有效值的改变会导致误差,故该系统不适用于船舶电网。然而,有一种相对简单的方法可连续测量相应的畸变系数。即将典型的功能单元直接应用在真实有效值测量仪中,这种直接基于畸变系数 k_u 的定义而实现的系统适用于船舶电力系统,如图4.3-9所示。

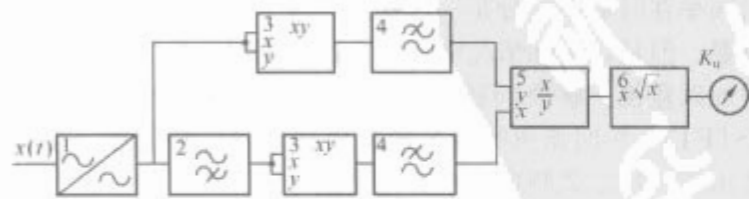


图 4.3-9 船舶电网主汇流排电压畸变系数的测量系统

1—输入系统; 2—高通滤波器; 3—平方运算; 4—低通滤波器; 5—除法运算; 6—平方根运算

上述系统中,使用了两条输入值处理线。其中之一是测量电压基波的有效值;另一条是模拟线,用来测量高次谐波的有效值。高通滤波器可消除信号基波。滤波器参数应该与电网基频相一致,并基于频率的变化范围为额定值±10%以内。

2.1.1.2 模拟量频谱分析仪

电网电压频谱的模拟量分析仪,是在声频或者低频范围内的信号级别的仪表,一般分为多通道频谱分析仪和计算频谱分析仪。

系统按设定的范围进行频率划分后,记录并显示所有不同频率信号的变化。这种全频域的同步分析方式非常适合完成需要较高频率分辨率的测量,系统方案见图4.3-10。

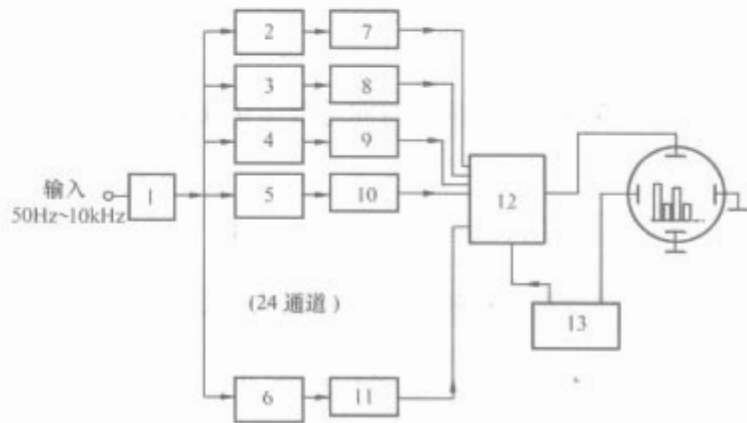


图 4.3-10 在全频域范围 (50Hz~10kHz) 内的多功能频谱同步分析器

1—前端放大器; 2—频率范围在 45~55Hz 的带通滤波器; 3—频率范围在 56~70Hz 的带通滤波器; 4—频率范围在 71~89Hz 的带通滤波器; 5—频率范围在 90~110Hz 的带通滤波器; 6—频率范围在 2.0kHz~11.1kHz 的带通滤波器; 7、8、9、10、11—常数探测器; 12—电子扫描系统; 13—扫描信号发生器

另外,扫描分析仪,是用于滤波器带宽只需要几赫兹的低频测量中,扫描过程很慢,无法完成电流的频谱图像。

其他的频率信号分析仪器,是一些含有畸变监控频谱分析功能的测量接收器,安装有测量畸变程度的探测器。ROHDE&SCHWARZ公司的EZM测量接收器,工作在频率为9kHz~1GHz,就属于这一类。

2.1.2 数字量系统

近来,数字系统在电能质量评估中的应用占有优势地位。这是由于数字系统的功能较强而价格相对低廉,也是因为使用电脑对运行过程进行控制以及进行信息存储变得越来越普遍。进一步发展合适的测量算法,还可以提高数字量系统的竞争力。

电能质量参数的数字化测定,需要根据已知的关系,电压、电流以及有功功率信号的有效值进行数字化计算。已测得电压或电流的有效值的计算如下

$$A_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_k^2}$$

式中: A_c 为电压或电流的有效值; N 为一个周期内信号采样的次数; a_k 为电压或电流的第 k 次采样值。

有功功率可由类似的方法得到

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k i_k$$

式中: P 为有功功率; u_k 、 i_k 分别为电压或电流的第 k 次采样值。

测试信号的波形分析是一个较为复杂的问题。如今,解决这个问题的典型工具是傅里叶变换和小波变换。

2.1.2.1 傅里叶变换

为了测得描述电压和电流波形的参数,首先需要进行电压和电流信号的频谱分析,接着计算所需的量。当然,这样的分析可通过模拟式仪表来完成。但该过程费时,且提供的

结果精确性差。如今,数字化技术已用于信号分析。傅里叶变换方法已普遍地用于信号分析,这与快速傅里叶变换(FFT)运算方法的开发有关。该方法极大地加速了计算过程并降低了对处理器容量的要求。若测试信号由傅里 A 叶级数中特定次数谐波之和来表述,则频谱分析可以被认为是时域内处理。傅里叶级数展开如下式所示

$$x(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \cos 2\pi h f t - b_h \sin 2\pi h f t) \quad (4.3-60)$$

傅里叶变换为将相应的时间函数转化为频率函数,符合下式

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (4.3-61)$$

傅里叶逆变换为将频率函数转换成有关的时间函数,即

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \quad (4.3-62)$$

若是离散信号,函数 $x(t)$ 被离散化为 $x(kT_s)$, 该信号为 T_s 采样时间内 N 次平均采样值组成,式(4.3-61)和式(4.3-62)中无穷时间的积分被有限项的和所替代。离散傅里叶变换运算如下

$$x\left(\frac{hf_s}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x(kT_s) \exp\left(-j\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (4.3-63)$$

$$x(kT_s) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x\left(\frac{hf_s}{N}\right) \exp\left(j\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (4.3-64)$$

式中: h 为频率参数; k 为时间参数。

离散傅里叶变换将在时域内 N 个采样序列点

$$x(kT_s) = (0), x(T_s), x(2T_s), x(3T_s) \dots x[(N-1)T_s] \quad (4.3-65)$$

变换为频域内的 N 个离散序列点

$$x\left(\frac{hf_s}{N}\right) = x(0), x\left(\frac{f_s}{N}\right), x\left(\frac{2f_s}{N}\right) \dots x\left[\frac{(N-1)f_s}{N}\right] \quad (4.3-66)$$

实现上述运算的测量系统中,采样序列 $x(kT_s)$ 是实际值序列,而变换后的序列 $x(hf_s/N)$ 通常是幅值和相位的复合值。

若采用连续的傅里叶变换,频谱 $x(f)$ 也是连续的,离散变换频谱是频谱线的一种形式。连续频谱线之间的距离与采样时间间隔成反比。

频域内 N 个采样序列点可由下式表述

$$x\left(\frac{h}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) W^{kh} \quad (4.3-67)$$

$$W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}, T_s = \frac{1}{f_s} = 1$$

式中: T 为标准采样周期。

计算 N 范围内序列中每个 $X(h)$, 需要将 N 项 $x(k)$ 实际值求和,包括复指数 W^{kh} 。为了确定序列,还需运算 N^2 复数乘法和 $N(N-1)$ 复数求和。最终 h 次谐波幅值可由下式决定

$$d_h = \left| \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi k}{N}\right) \right| \quad (4.3-68)$$

Cooley 和 Tukey 所精心设计的一种新的算法—快速傅里叶变换,是对离散傅里叶变换(DFT)计算方法的本质突破。由于快速傅里叶变换(FFT)的应用,计算时间大大缩短了。如, $N=2^{14}=16\,384$ 点时,计算时间缩短比率为 $14/16\,384$ (即从一小时降为几秒钟)。快速傅里叶变换

(FFT)法可以在极短时间内将信号多次采样并计算出傅里叶变换。

2.1.2.2 小波变换

MRA 根据不同的频率范围将信号进行分解。子空间 $V_m \subset L^2(R)$, 尺度 2^m 与每个范围有关。子空间 V_m 遵守下列条件

$$(1) \{0\} \rightarrow \dots V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \dots \rightarrow L^2(R) \quad (4.3-69)$$

(2) $\varphi(t) \in V_0$, 称之为尺度函数,选择一组这样的函数

$$\{\varphi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \varphi(2^{-m}t - n) \quad n \in Z\} \quad (4.3-70)$$

形成子空间 W_m 的正交基, $m \in Z$ 。

子空间 V_m 的正交补,表示为 V_m , 定义为 $V_{m+1} = V_m \cup W_m$, $\psi(t)$ 称为小波函数,选择一组这样的函数

$$\{\psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}t - n) \quad n \in Z\} \quad (4.3-71)$$

形成子空间 W_m 的正交基。

函数 $\varphi(t)$ 与 $\psi(t)$ 满足二维方程,以便进一步分析

$$\varphi(t) = 2 \sum_1 g(1) \cdot \varphi(2t-1)$$

$$\psi(t) = 2 \sum_1 h(1) \cdot \varphi(2t-1) \quad (4.3-72)$$

序列 $g(1)$ 和 $h(1)$ 定义了尺度函数以及小波的形状和性质。函数 $y(t)$ 可近似认为是线性化组合的函数

$$y(t) = \sum_k c_{M,k} \varphi_{M,k}(t) + \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_k d_{m,k} \psi_{m,k}(t) \right\} M=1,2,\dots \quad (4.3-73)$$

其中

$$c_{M,k} = \int y(t) \varphi_{M,k}(t) dt \quad k \in Z \quad (4.3-74)$$

$$d_{M,k} = \int y(t) \psi_{M,k}(t) dt \quad m=1,2,\dots,M \quad k \in Z \quad (4.3-75)$$

参数 M 定义了分解的“程度”。 M 越大,信号分解的频率范围越低。实际上,使用的 M 值不大于 5 或者 6。

2.1.2.3 傅里叶变换与小波变换

傅里叶变换,由 Joseph Fourier 设计用来分析时变函数。其本质是将时域内的函数变换为频域内的函数。在时域内无法对函数清楚地进行分析时,可用此方法。然而,船舶电力系统的实际信号中,除了谐波和间谐波引起了信号畸变,还出现了一些瞬时扰动(瞬时的,突降性的)。这些扰动周期很短,从几个纳秒到几十毫秒。正由于其周期短,对总谐波畸变系数 THD 的测量以及谐波含量的测量,就不能保证能够正确地对这些扰动进行评估。原因是傅里叶变换中,正如前面已经提及,相互正交的正弦—余弦函数其积分时间为无穷,因此只能确定信号中出现了何种频率,而未指出频率在时域中的分布。这些信息对于稳定信号来说,并不重要。但是,实际情况中经常有这种瞬时干扰的发生,故必须加以重视。解决问题的办法之一是引进短时傅里叶变换(STFT)。短时傅里叶变换的本质是划分待测信号,并假定其出现在特定截频窗口中为恒定信号。

$$\text{STFT}_x^w(\tau, f) = \int_t [x(t) \omega^*(t-\tau)] e^{-j2\pi f t} dt \quad (4.3-76)$$

式中: $x(t)$ 为变换函数; τ 为移位; $\omega(t)$ 为窗函数。

此方法获得的信息,既描述了时域信号,又描述了频域信号。然而其缺点之一是截频窗口的长度需要预先设定。若长度缩短,则时域内测量会得到改进,但代价是损害了频域内测量的分辨率。

目前,一种用于对瞬时信号包括含瞬时成分信号进行分

析的方法, 为小波变换 (WT)。如果式 (4.3-76) 中, 一组积分时间为无穷的正弦—余弦函数改为有限持续时间且相互正交的函数 (窗函数 ω 非必要), 并将其适当扩展并沿着信号 $x(t)$ 进行移位, 就可得到连续小波变换 (CWT)

$$\text{CWT}_x(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (4.3-77)$$

式中: τ 为移位; s 为尺度; $x(t)$ 为变换函数; $\psi_{t,s}(t)$ 为基小波 (母小波)。

因此, 小波变换将只有一个变量的时间的函数, 变换为两个变量的时间和频率的函数。如此, 当给定频率出现时可以测量瞬时值, 把干扰的性质与持续时间识别出来。而频率越高 (尺度越小) 则时域内分辨率越高, 而频域内分辨率越低。

低频段不能在时域内较好的“定位”, 而在频域内则可以。随着所分析频率越来越高, 情况也不同了。由于实际信号的低频部分持续时间更长, 小波变换的多分辨率特性比短时傅立叶变换更有优势。正因为如此, 小波变换已经成为瞬时干扰检测和分析的基本工具之一, 可精

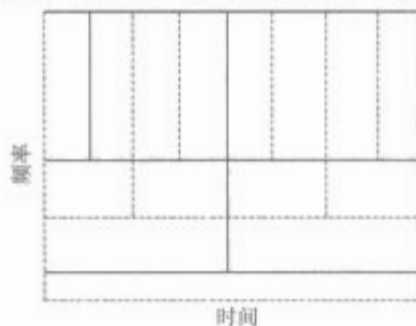


图 4.3-11 时域与频域内分辨率的说明

确定确定干扰的时间函数, 并确定其特征。图 4.3-11 用图表的方法说明了时域与频域内的分辨率。

图中显示的每个块对应于时间—频率平面上的一个小波变换值。观察一些非零的区域, 这意味着平面上某些点的值未知, 这些值用小波变换来表示。值得注意的是, 尽管长和宽有可能会变, 但是区域的面积保持恒定, 即设定的区域代表着相等的时间频率平面, 但根据时间和频率, 表示的比例不同。可以发现, 随着频率降低, 块的高度也降低, 但是宽度增加。若高频降低时, 也就是说时域内的分辨率变高, 块的高度上升, 频域内的分辨率降低。

还需一提的是, 这样的划分看起来像是短时傅立叶变换 (STFT)。当使用短时傅立叶变换时, 时域和频域内的分辨率, 由用来分析的窗口的宽度来决定。这就是说在时域和频域内, 分辨率不变, 因此短时傅立叶变换所描述的区域不是方形的。不论块的尺寸如何, 两种情况下 (短时傅立叶变换和小波变换), 面积相等。

2.1.2.4 电能质量指标与小波变换

离散小波变换法 (DWT) 已经用于船舶电力系统中瞬时扰动的测量和评估。离散小波变换算法中用到了两种滤波器: 低通滤波器和高通滤波器。信号在分成 3 种频带的情况下, 形成了较复杂的结构如图 4.3-12 所示。为简化图形, 图示结构包含了 3 种较高频带的信号的分解与重构 (分析与合成)。实际情况下, 许多频带的设定取决于测试信号的基波以及采样频率。因此, 在精度与必要的数学运算过程之间要采取折中的办法。

瞬时扰动的测量和评估算法中, 有两个基本步骤: 信号分解与重构。频率范围在 $0 \sim f_p/2^{P+1}$ 之间 (f_p 为采样频率, P 为重构信号时所采用的频带数目) 包含的信号分解后, 进行信号的重构。数字滤波系数 $g(n)$ 与 $h(n)$ 之间的关系如图 4.3-12 所示, 可由下式表述

$$h(L-1-n) = (-1)^n \cdot g(n) \quad (4.3-78)$$

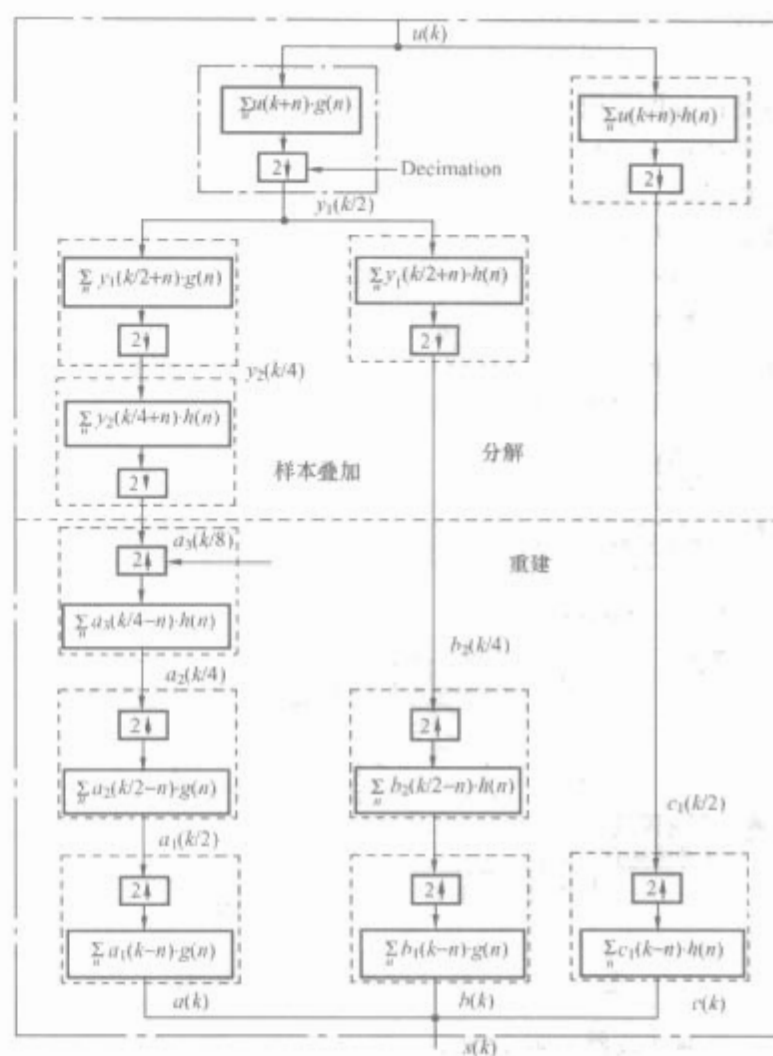


图 4.3-12 用离散小波变换进行瞬时扰动检测的算法流程图

$a(k)$ —频率带宽在 $f_p/16$ 与 $f_p/8$ 的信号取样; $b(k)$ —频率带宽在 $f_p/8$ 与 $f_p/4$ 的信号取样; $c(k)$ —频率带宽在 $f_p/4$ 与 $f_p/2$ 的信号取样; $s(k)$ —频率带宽在 $f_p/16$ 与 $f_p/2$ 的信号取样

式中: L 为滤波系数数目; $h(n)$ 为高通滤波器; $g(n)$ 为低通滤波器。

电力系统中实际信号的测量过程中, 若伴随有噪声出现在所分析的频带范围内, 会引起测量结果上的问题。一种典型的解决方法, 即引入一个比可能出现的干扰高一些的阈值。然而在测试频带内谐波或者噪声值较大时, 该方法不足以解决问题。此时需要增大阈值, 结果在评估干扰持续时间时出现问题。

下列不等式用来确定扰动持续时间, 是一种简单而有效的方法

$$[|s(k) - s(k-1)| > p_1] \vee [|s(k)| > p_2] \quad (4.3-79)$$

式中: $s(k)$ 为高频信号分量之和的瞬时值; p_1, p_2 为设定的阈值。

式 (4.3-79) 的逻辑值为“真”的第一个事件等价于瞬时扰动开始, 该式为“真”的最后一个事件为扰动的结束, 在这之间有许多瞬时逻辑值为“假”的情况。

显而易见, 式 (4.3-79) 并不能确保可完全检测到电力系统中出现的扰动。小振幅且不包含高频分量的扰动就不可能被检测到。由于这样的扰动对船舶电力系统运行的影响并不重要, 可能因此而忽略了此种情况。值得指出的是, 其他同样简单的分析方法显得更加不可靠 (如测量所有高频信号或选定频带的绝对平均值或者有效值的方法)。

2.1.2.5 数字频谱分析仪

一台数字信号分析仪可以采用数字示波器, 并通过特定

的程序来变换采样信号。

实际上,使用安装有附加系统的专用仪器(分析仪),可使得分析过程更加便捷和快速。该系统通常有比示波器位数更高的 A/D 转换器(12~14 位)和频带(几百 kHz)。分析仪的一个基本的和标准的部件是防止频谱重合的输入滤波器—转换采样信号的数字滤波器。

在图 4.3-13 所示的分析仪的设计例子中,输入电路包含了低噪声和小畸变的测量分频以及测量放大系统。另外,分析仪的输入电路还包括标准信号源,以便自动进行放大器的增益校正和不平衡因子的校正。

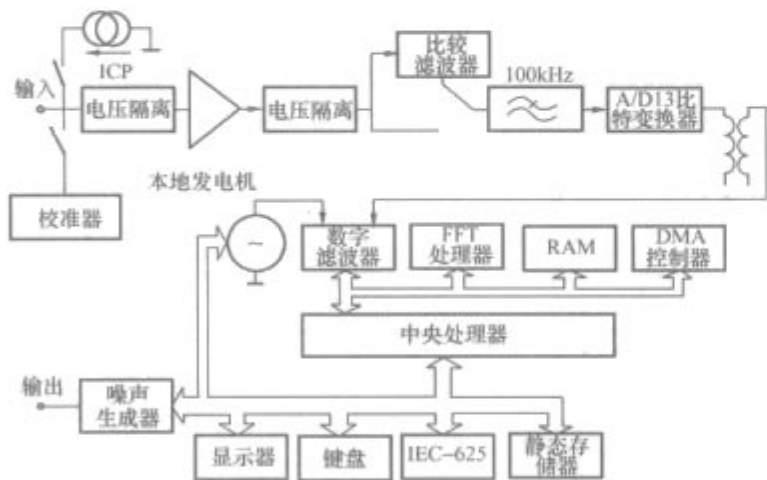


图 4.3-13 数字信号分析仪的框图

低通滤波器的限定频率,如 100kHz,用于限制输入信号的带宽,以防频谱信号重叠。

图 4.3-13 所示的系统中, A/D 变换器为 13 位,处理速度为每秒 256×10^3 采样点,可以进行 100kHz 频率的信号变换。

A/D 变换,分两步实现:第一步,数字滤波器为快速傅里叶分析准备好数据。第二步,由专用的快速傅里叶变换处理器完成快速傅里叶变换分析。分析中所用的处理器为摩托罗拉公司的 16 位微处理器 M6800。快速傅里叶变换作为离线处理器,并非实时的处理过程。第一阶段中,采集到的采样序列转换为数字形式,第二阶段中采样序列进行快速傅里叶变换。微处理器实现快速傅里叶变换的计算处理过程并控制着整个分析仪的运行。使用这样的系统,1024 个采样点的处理时间为 1~10s。

2.2 用于电能质量评估的新设备

2.2.1 陆地电力系统中采用的设备

近来,测量仪表的设计大多基于微处理器系统,可以进行畸变波形的测量。例如,由“METROL”电量测量研究中心出产的 PMPS 是便携式多参数仪表,不仅可替代目前使用的单参数仪表,而且还可以通过适当的软件,如 MPS-AHV 进行被测对象的谐波分析,可以测出特定的谐波分量、谐波畸变系数 THD 以及电网中待测电压和电流的有效值、波形系数和峰值系数。若该仪表与变压器或者变流器协同工作,可根据所用变换器的额定值更改设备的量程范围。它主要用于三相四线制电网运行参数的测量、指示以及记录。所记录的测量值可以通过 RS-232 或者 RS-485 传送至 PC 单元。

还有一种电信号的分析仪表,意大利生产的 Multiver 3H,为便携式可编程仪表,可测量频率、电压、电流强度、有功功率、无功功率、视在功率、功率因数,并且可以进行电压和电流的谐波分析。谐波分析可确定包括 25 次谐波在

内的相关谐波值。分析结果以数字或者图表形式显示在 LCD 或者监视器屏幕上,包括待测高次谐波分量,以及在编程时间间隔内谐波的统计分析。Multiver 3H 配备有 2 个 RS-232 接口,可与外部 PC 或者打印机进行通信。另外,还有 RS-485 接口与 PC 单元进行通信。

该仪表的频率范围在 1~600Hz,频率 $f=50\sim60\text{Hz}$ 时测量电压 $U=440\text{V}$ 。由于带有 I/U 变换器,频率 $f=50\sim60\text{Hz}$ 时电流回路可以获得 1mV 至 1V 的电压降。使用了 FFT 来进行谐波分析。采样频率调至 4000 次/s 以便与待分析信号的频率相匹配。电压和电流测量的最大误差不超过 5%。

上述仪表借助专用软件以及谐波分析结果,可以确定电压和电流波形的一些特性参数,如描述畸变功率特定成分

的参数,以及描述电压和频率与设定值偏差的参数。

2.2.2 船舶电力系统采用的设备

新型多功能可编程测量仪表用于船舶电网,将电网信号瞬时值直接采样处理成为数字格式。这种新型多功能测量仪表的设计,可以完成下列功能:①测量电压 $u(t)$ 以及相电流 $i(t)$ 的瞬时值;②测量频率值 f_s 、 f_g 以及相位角 φ ;③计算电压、电流和功率 (U 、 I 、 P 、 S) 的有效值,根据选定的测量功能可以测量的系数值有 $\cos\varphi$ 、 λ 或者 $\cos\varphi/\lambda$;④定性的(粗略的)和定量的(精确的)测量值;⑤将初始测量结果及最终的测量结果与外部电脑系统进行通信。多功能测量仪表的设计概念如图 4.3-14 所示。



图 4.3-14 应用在船舶电网中的多功能测量仪表的设计

微处理器的内部程序控制着微处理器的运行及相应功能,是测量流程不可分割的一部分。特定参数的测量过程就是用这种方法实现,由程序中存储的一系列指令决定。相对简单的系统结构确定后,可实现的测量功能取决于处理器内部的程序算法。不管是现场或者是遥控,亦或改变测量功能,只要选择和执行电脑程序中的特定程序即可。图 4.3-15 中显示了基本的测量算法结构,由 FCDIS-1x 设备完成。

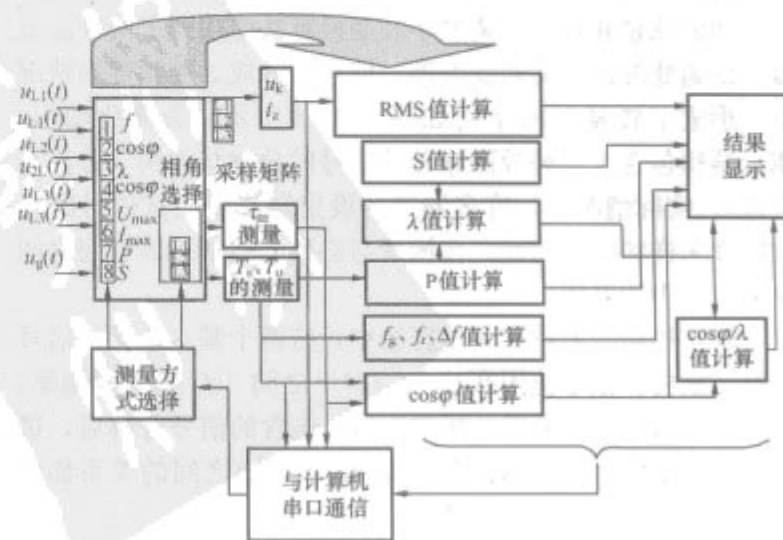


图 4.3-15 通过 FCDIS-1x 设备完成的基本测量算法流程图

受控电力系统的电路与所用仪表之间的连线图如图 4.3-16 所示。

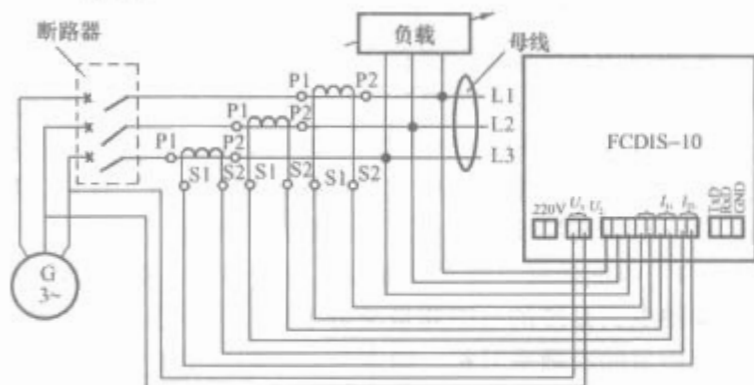


图 4.3-16 电网中 FCDIS-1x 仪表的应用连接

仪器中采用了测量线路校正的方法，可以进行简单的自动校正。其本质是分别校正电压和电流测量线路的校正系

数， k_U ， k_I ，基准源产生稳定电压，同时考虑到附近测量的结果。

微处理器内部程序实现的测量周期包括：①初始量值的测量，包括电压电流瞬时值的 A/D 处理；②中间量值的计算；③将数据存放至特定存储区域；④与外部系统的通信；⑤测量功能可选择的变化；⑥所实现测量功能的识别；⑦所选测量功能的实现，针对结果的定性和定量识别以及一些已实现功能的标识。

值得一提的是，其采用的一种存储格式可以存储 10 位的电压电流及其极性的采样信息。是对常规的 8 位数据存储的一种更经济的利用。

在仪表的原始设计中，开发了一种新型的显示系统（图 4.3-17）。安装了刻度流程，可以定性和定量地显示结果，从而不仅可保证得到粗略估计测量值，确定超出测量范围的方向，而且可以从七段数码显示管上读出当前值。该方法受到专利保护，其系统新颖性在于指示元件的控制。

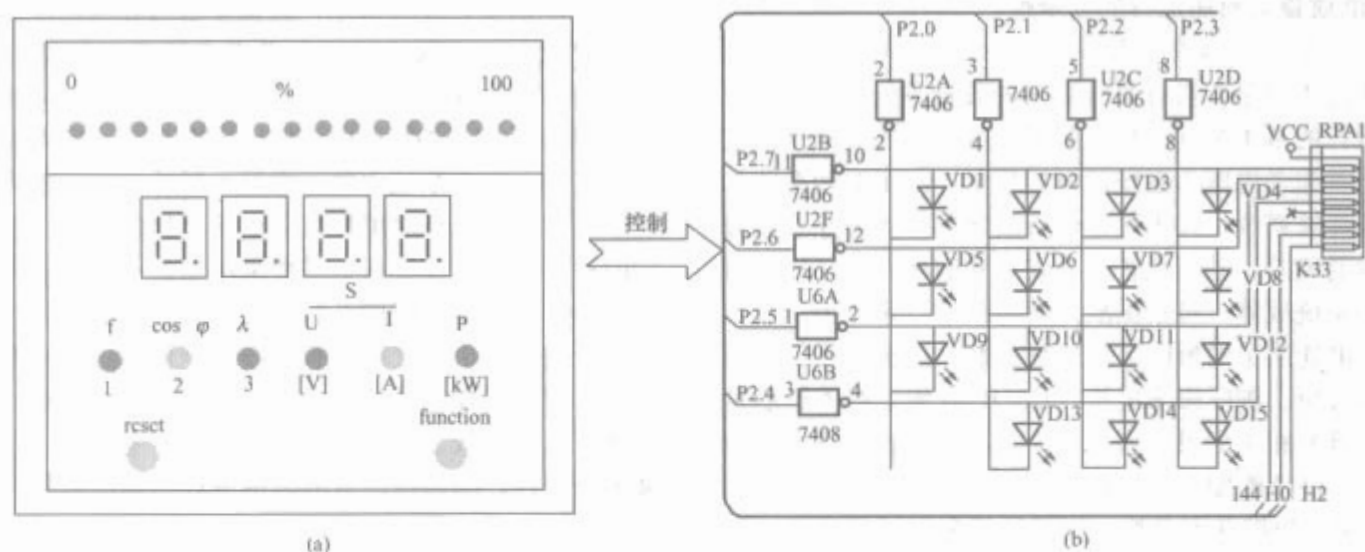


图 4.3-17 应用于 FCDIS-1x 系列多功能仪表的测量功能中指示和信号显示系统
(a) 盘面视图（配电盘外壳）；(b) 定性结果指示系统结构图

FCDIS-1x 仪表电路安装在三块独立的电路板上：①测量线路板；②显示以及信号电路板；③供电电路板。

金属板装配在 m96×96 NGS9616BOPLA 型机架上。设备部件的排列如图 4.3-18 所示。测量线路板与指示以及信号显示系统金属板之间的连接，使用了 CO3 角形连接器，测量线路板与供电系统板之间的连接，使用了一个 ZL1 连接器和一个电缆包。

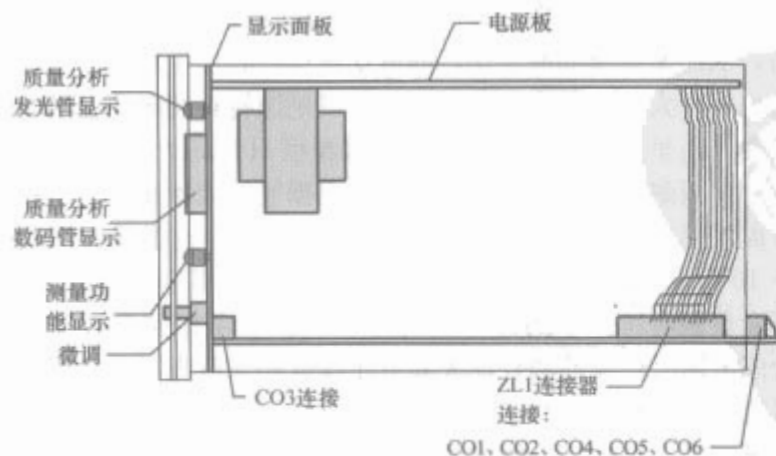


图 4.3-18 带外壳的 FCDIS-1x 仪表的组成与结构

新型多功能微处理器的运行特性分析及其在干扰条件下的灵敏度分析，已在波兰船级社批准的环境测试计划下完成。

环境测试计划除了仪表基本的功能测试，还有各种情况

下抗扰动能力的测试，例如供电电压骤降突变，暴露于各种可编程的空气参数（温度，湿度，盐雾）中，机械因素（振动和倾斜），以及传导干扰。该新型多功能微处理器仪表还进行了有关介质强度，绝缘电阻，静电以及电磁辐射的测试。

按照测试结果，新型多功能微处理器仪表运行特征在下列范围内优于目前船舶上使用的设备：①对船舶电网的电能质量参数的测量范围更加广泛；②可以与船舶电站中央监控系统进行通信；③测量结果可视化，可以进行所需的分析。

可见，新型多功能微处理器的使用，可以获得更全面的船舶电力系统参数信息。这有助于改进船舶电力系统的运行效率与安全性。多功能微处理器仪表作为船舶电力系统的测量工具，在船舶电力系统的参数测量和电能质量的评估方面会有新的发展。

3 船舶电网电能质量的控制

3.1 进行电能质量控制的必要性

输配电系统本身的耗电，特别是电力系统的线损，产生了不可忽视的电能损耗。对于船舶电站而言，因船舶设备的容量选择较为保守，正常运行时功率因数偏低，其节电的潜力更为显著。即设法减少电力系统的无功功率是一项较为有效的措施。同时，提高网侧功率因数可避免在大负载启动时引起电网崩溃的危险。

另外，在船舶电站中，电动机耗能至少占总发电量的一半。其中，又有相当一部分应该调速运行，即由变频器供电。而变频器的核心部分是采用 PWM 的 DC/AC 变换器。其前级仍然是 AC/DC 变换器，而且基本上还是采用传统的整流方式。但不管是相控式还是不控式整流电源和装置，在运行时，必然要从电网吸取无功功率（即装置侧功率因数偏低的原因），同时向电网注入谐波电流。即使是 AC/AC 变换器，也是一种无功和谐波源。并且，船舶上一些给大负载供电的变换器的功率占电网容量的百分比比较高。也就是说，对于船舶电网，一个具有复杂环境的，又越来越多地应用电力电子变换器的独立的小容量电网，谐波造成的影响更为显著。例如更易于造成其他设备的不正常运行。而消除高次谐波不仅提高了功率因数，减少了无功功率，也减少了有功损耗。同时，因减少了高次谐波对通信、导航系统及海难救助设备的干扰也提高了船舶航行的安全性。另外，还可降低环境噪声等污染。

3.1.1 电能质量与船舶运行的安全性

船舶电力系统是船舶动力系统的一部分。电能的生产、传输和使用过程中是否具有符合要求的质量是船舶动力系统能否正常运行的基本条件。故从船舶系统操作的安全性角度而言，应当首先考虑电力系统的电能质量。对于船舶系统如推进系统或导航系统，几乎每个运行故障都不能排除导致海上意外事故的风险，甚至危害人身安全和破坏海洋环境。对于船舶电力系统故障，可根据故障发生的地点来归类。但是当故障是由电能质量的短时突然恶化引起，则很难进行故障发生的原因分析。国际海事组织（IMO）收集了有关船舶紧急情况 and 灾难的相关记录。表 4.3-4 中，根据故障发生的地点，总结了 120 个船舶电力系统或电子系统所发生的故障。但表 4.3-4 中的数据并不完整，仅仅是船东们把船舶产生的严重故障上报到了有关机构（如船级社）。而且并未给出发生故障的原因，只是指出了发生的地点。值得注意的是在标在“其他”一栏的故障统计数据，常常是一些涉及到船舶电力系统中电压波形以及电流波形的畸变，以及电压电流之间的不平衡现象的案例。可见，表 4.3-4 中的大部分故障都与电能质量问题有关，更严格的说，与电能质量的下降有关。

表 4.3-4 船舶电力装置故障统计数据		
故障产生的位置	故障的数量	百分比
发电机原动机	20	16.7
发电机	16	13.3
电力系统	31	25.8
辅助设备	18	15
其他	27	22.5
火灾/水患	8	6.7

对船舶电力系统的安全运行影响最大的是电能质量的瞬间恶化，而电能质量的长期恶化通常首先是影响系统运行的经济性。值得关注的是电能质量的长期恶化会引起系统中的重要设备的耐用性和可靠性的降低，从而也导致了船舶系统运行的安全性的实质性下降。为了消除这种不良影响，同样也需要增加船舶系统的维护费用，包括劳务方面的成本。

例如，船舶电站中电能质量的瞬间恶化常常发生在发电机组投入并联运行过程中。虽然对船舶电站有相应的安全规定，即船舶在海上航行时有必要保持每台发电机组的功率余量达到相应的单台发电机额定输出功率的 20%。但对于过渡过程则有所放宽，然而，即使在过渡过程中，任何有关推

进系统和舵控系统的故障，都会威胁到船舶安全。在这种情况下，确保船舶电力系统供电的连续性就显得极其重要了。

3.1.2 电能质量参数与船舶运行的经济性

船舶电力系统电能质量的下降，既有瞬时效应，同时也有长期效应。这儿讨论的是特定电能质量参数对船舶系统运行经济性方面的影响，在电能质量恶化后所产生的额外的损耗，以及船舶设备中的一些常用器件，如，电机、仪器、照明器件——也就是照明灯和信号灯的耐用性下降。

3.1.2.1 电能质量下降对船舶发电机组和电动机的影响

船舶电力系统的电能质量是否下降，可以借助于各种描述电能质量的参数来分析。通常为：三相供电电压的有效值及其频率的变化，波形形状的改变，并联运行的发电机组的有功与无功功率分配是否与相应的发电机组的额定功率成比例。

而电能质量下降所产生的影响，需要从多方面进行考虑，首先是船用电动机运行时的供电电压变化带来的影响。供电电压偏差、频率偏差，其偏差值与相应的额定值相比所占比例较大，一般还同时伴随着电压波形畸变，电压不平衡，有时还会伴随着电动机运行的环境压力（周围的高温往往超过 50℃），这在很大程度上降低了电动机寿命。这种影响，在陆上电力系统中并不常见。另外，陆上电力设备不像船舶电力设备运行时那样负载受到严格的控制。若上述因素同时存在的话，就要根据需要采用新的办法来选择电机。

另一个问题是船舶电站中发电机组是并联运行的。若并联运行的发电机组之间负载不按规定比例进行分配，就有可能一方面使船舶电站过载，另一方面有不少未被使用的备用功率，从而导致了船舶安全性的下降，也会增加燃油消耗，降低经济性，因为内燃机的燃油消耗与其所承受的负载之间是非线性关系。

3.1.2.2 电压波动，电压不平衡以及频率变化造成的影响

不管船舶的现代化程度如何，任何一个船舶电力系统都会出现短时或者长时的电压波动和频率波动，这不利于许多电力设备的运行，如电动机、电力变换设备以及电源。电压降会严重影响自动控制系统的运行，会导致控制故障、数据丢失以及误报警。

电压和频率的波动对电动机运行的影响是一个重要问题。电压偏离额定值，使得感应电动机总的功率损失增加，转速发生变化。频率的变化还会严重影响电动机的转速。值得一提的是，电压和频率的波动对电动机运行的影响只能在稍长时间后才能体现出来。电能损耗的增加使得绕组温度升高，从而使绝缘加速老化，即电动机运行时发生故障的可能性也就增大了。需指出的是，电动机绝缘材料的耐用性随着温度升高呈指数下降，即便是绝缘温度只升高大约十几度，也会缩短耐用寿命的百分之几十。根据船级社颁布的电动机方面的标准，电压偏离额定电压±5%，产生的温升不应高于 10℃的。实际上，感应电动机电压降低到额定值的 90%，额定负载时所产生的温升大约为 6~7℃。考虑到电缆连接处的电阻所造成的额外损失和电压降就相当可观了。对于电机拖动，其转速上升的持续时间相对来说较长，从而加速了机械元件（轴承，压缩机活塞等）的磨损，而其转速下降则使流经船舶冷却系统和润滑系统的介质的流量下降，也会影响到船舶机械的使用寿命。另外，转速较低时，空气冷却式电动机的冷却情况变差，从而引起绝缘温度上升。

在船舶电力系统中，由于电压和频率的控制系统相对较独立，且允许电压和频率与额定值相比有一定量的偏差，电压与频率的比值有时变化较大。这使相应的电动机和仪器的

磁路中的磁通量发生变化,使其偏离了最佳运行条件。若电压和频率同时变化且其比值保持恒定,则电动机的电磁转矩保持最大值不变;其转换功率也保持不变。因此,船舶电网中电压和频率的比值应保持不变。这需要设定调压与调速的斜率系数相等。

供电电压的波动对电力驱动系统的运行来说影响很大。根据电动机转矩特性,电压变化会使得整个驱动设备的运行不稳定。电动机转子及其耦合设备在角速度上升或下降时,可以导致整个驱动系统振动。电动机长期在这种环境下工作,会加速电动机本身以及驱动设备的磨损。

另外,三相供电电压的不平衡对电动机运行的影响也较大。由于供电电压的不平衡,会产生一个反相动量,降低了有效动量,引起绕组温度上升。产生供电电压不平衡时,根据其不平衡情况,有必要限制电动机的负载。由于供电电压不平衡使得许多单相用电设备工作在比额定电压高的电压下,还有一些工作在较低的电压下,对这些设备的运行很不利,从而导致经济性下降。

一般地,供给电动机的电压在质量上带有畸变、不平衡、频率不恒定以及有效值具有波动性,则会导致电能的各种额外损失。船舶电力系统中大多数感应电动机运行在恒定负载下,电压和频率偏离额定值越大,供电电压的畸变,不平衡,等的电能质量问题越突出,越会使得电能的额外损失积累起来,结果所导致的电动机绕组的温升比局部分析要高。

电压下降对电力驱动系统中的开关运行有较大影响:低电压导致触点接触压力降低,还可能导致接触电弧,甚至脱离衔铁。而电压值上升可能会导致开关的机械故障或者触点的强力吸合造成的回弹,从而降低开关性能。若给电力设备提供的是交流电压,电压/频率比值的任何变化都会降低电力驱动开关的性能,其根本原因是衔铁吸引力的变化在通常情况下,例如在静态时,与上述比值的二次方成比例

$$F \approx c \left(\frac{U}{f} \right)^2 \tag{4.3-80}$$

而触点压力 F 对于触点阻值 R_c 的影响很大

$$R_c = \frac{\chi}{F^\alpha} + k \frac{\sigma}{F^{2\alpha}} \tag{4.3-81}$$

式中: R_c 为触点阻值,触点电阻值升高会引起其温度升高,以及使用寿命下降; F 为触点压力; χ 为由触头材料决定的常数; α 为指数等于 1/3 或 1/2; σ 为采用实验方法决定的常数; k 为比例系数。

电压偏差对灯光的影响取决于偏差的性质,也涉及到照明器元件种类。白炽灯和荧光灯是船上最常用的照明灯。供电电压变化对白炽灯和荧光灯的功能影响不同。供电电压上升时,白炽灯的发光效率提高(即光通量与光源吸收能量的比值),使用寿命迅速下降;对荧光灯来说,发光效率会降低。而供电电压下降时,两者的光通量都会减少,不利于人员在照明处所的安全工作(例如机舱等工作场所),另外航行灯的光通量下降,影响船舶安全航行,尤其是航行在能见度有限的时候。电压 U 供电,电灯泡的光通量可由式(4.3-82)表述,荧光灯的光通量则如式(4.3-83)所述。

$$\Phi_U = \Phi_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{3.6} \tag{4.3-82}$$

$$\Phi_U = \Phi_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{1.8} \tag{4.3-83}$$

式中: Φ_n 为额定电压 U_n 下的光通量。

值得一提的是,额定电压下降 8%,白炽灯发光效率要

下降 20%。通常,白炽灯允许的电压变化不能超出额定电压-8%~+6%的范围。

然而,白炽灯以及荧光灯的经济运行是及其重要的。船上安装了许多这样的灯,较多的一部分安装在机舱,走廊,技术舱,保持连续运行。表 4.3-5 显示了联合滚装船 IN-OWROCALAW 甲板上安装的白炽灯以及荧光灯的具体数量。

表 4.3-5 装设在船上的荧光灯和白炽灯的数量

种 类	电功率 (W)	数量 (只)
荧光灯	40	380
	20	748
白炽灯	60	230
	40	222

供电电压上升,对于白炽灯的经济运行来说,影响极大,使其使用寿命急剧下降,关系式如式(4.3-84)所示,

$$T_U = T_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^{-14} \tag{4.3-84}$$

式中: T_n 为额定电压 U_n 下的使用寿命,通常等于 1000h。

如白炽灯这样的船舶电力系统中的许多设施,有很大一部分需要连续工作,其使用寿命的严重下降,使得在考虑经济性时不能被忽略。尽管其单价较低,但价格与购买地点有关,亦即与船舶营运区域紧密相关(储备大量的备用灯泡并不合理)。另外,船上还有大量低功率的信号灯,其数量与电灯泡数量接近。船舶上的另一种重要照明器件,也就是荧光灯,其使用寿命很大程度上取决于开关操作的次数和电压的长时偏离额定值。船舶电力系统中严重的电压骤降(包括电压崩溃)往往具有随机性,通常由系统部件的故障引起的。电压降对荧光灯的影响取决于荧光灯的运行时间,已工作较长时间的荧光灯更易于受损。

电能质量降低对船舶照明及信号灯经济运行的影响,还关系到需要增加更换故障灯具的劳务费用。这种更换,所需的劳务费用取决于船舶的类型及大小,平均来说达到每人每天一小时的工作量。

在上述分析中,其他应用于船舶的照明光源如卤化灯、钠灯、汞弧放电灯都忽略不计了。这些灯主要用于甲板照明,因此只在船舶靠港时工作。另外,考虑到这类灯具的功率远小于所有安装的白炽灯和荧光灯的功率(例如:在 IN-OWROCALAW 船舶上,只占灯具总功率的 32%),可以认为由于电能质量变坏而这部分灯具所增加的运行费用,相对来说很低。

3.1.2.3 电压畸变造成的影响

供电电压波形畸变首先是导致高次谐波和间谐波,以及瞬时电压降和宽频域内的噪声。这些畸变对用电设备的影响根据畸变性质的不同而不同。

供电电压中包含的谐波和间谐波,几乎对所有用电设备的运行都有影响。由于高次谐波引起的发热,使发电机带负载的能力下降,导致一些安全装置误动作,以及加剧电缆及电力机械的发热;而且也影响了半导体变流器件本身的运行。例如,变流器供电电压畸变使得其性质发生变化(例如:允许的输降低),安全装置受到激励会引起误动作,或引起安全装置的永久性故障(例如:发生过电压)。

另外,电压畸变所造成的一些损耗也很可观,如磁路中铁心的额外损耗,以及用来改善功率因素的电容器的功率损耗,荧光灯的功率损耗,等。当电压中高次谐波较大时,还

会加剧绝缘的恶化,以及导致电容器故障。由于磁通的畸变而导致的铁心功率损耗可由下述简化的表达式表示

$$P_{Fe} \approx P_{Fe1} \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{\frac{f_1}{f_h}} \left(\frac{U_h}{U_1} \right)^2 \quad (4.3-85)$$

式中: P_{Fe1} 为针对基波电压的铁心损耗; U_1 为基波电压; U_h 为 h 次谐波的电压; f_1 为基波频率; f_h 为 h 次谐波的频率。

而对于电网中电压波形的分析表明,实际船舶电力系统中的铁心损耗,会比预期高百分之几。

发电机的供电电压畸变,另一个影响是谐波电流流经发电机定子和转子时会产生电磁力矩。但高次谐波和寄生力矩会产生较大的振动及噪声,甚至会阻碍发电机启动。

负载电流中的谐波,对测量系统工作的影响也值得关注,因为电流变换器主要用途就是这个。例如 0.5 级的变流器,在梯形额定电流时,总的误差会增至 1%。变换器初级绕组的电流波形对上述误差的影响,取决于次级电路的性质,且相位系数 $\cos\varphi$ 在 0.6~0.8 范围之间时影响最大。

另外,电压和电流波形的失真,会对电力保护系统产生不利影响,增加了电压偏差,不利于船舶发电机调压器的工作。

瞬时扰动及噪声对无线电通信和电子导航设备以及船舶自动化系统的影响较大。瞬时扰动会引起这些设备不正常运行,甚至停止运行。这些扰动通过电缆网络很容易传播开来,因此需要通过滤波器或屏蔽设备,连同电缆一起防护。

需要说明的是,有必要采用电能质量的电流控制原则,才能得到受控系统中较本质性的故障信息,从而可识别出诸如电压和频率调节器,谐波滤波器,以及大功率用电设备,等一些重要系统和器件运行中可能产生的不可靠运行状态,并且可以在船舶电力系统出现故障之前,采取恰当的防护性检查。

3.2 船舶电网电能质量的改善方法

船舶电力系统运行时,本质上只有两个参数与电能的生产和使用有关,即需要控制的电压值以及频率值。参数值超过船级社定规范规定中的允许值时,会使相应的安全装置动作,包括应急停机(断电)。目前较能被接受的电能质量解决方案中,尤其是涉及陆上电力系统,均着重于解决变流过程中的扰动以及系统中的负载工作特性。但是该领域的研究已有许多重要的成果,但是还有很多方面需要探索。在这个还未获得充分的研究结果的领域,不仅需要对降低上述扰动的有关技术进行研究,而且还要研究如何提高用电设备的抗扰动能力,尤其是对于复杂的电子设备和系统,如 GMDSS(全球海难救助与安全系统)和无线电导航设备。值得注意的是,目前,许多与供电系统相联的用电设备对扰动十分敏感,主要是由于所采用的信号电压越来越低,而其工作频带却越来越宽。

3.2.1 通用的改善电网电能质量的方法

降低电力系统的扰动有诸多方法,但是还不能完全消除这些扰动。较为常见的有:将对扰动敏感的用电设备隔离开来,从而降低扰动对这些设备的影响;或应用在抗扰动方面性能较好的或对抗扰动起抑制作用的设备。隔离对抗扰动敏感的用电设备,可以用下述两种方法:①将给定电力系统分成各个子系统,并选择受干扰较小的子系统给特定的负载供电;②采用系统主配电板(如 $3 \times 1000V$, $50Hz$),经变压器或者变换器给通用电网供电($3 \times 380V$, $50Hz$)。

为降低扰动造成的后果,特别是为了抑制超出允许值的

高次谐波。可使用谐波抑制变压器以及各种谐波滤波器,也就是有源滤波器,无源滤波器,以及近年来运用越来越多的混合式滤波器。上述的后一种方法,可以降低因电能质量降低所引起的危险,使在扰动过程中负载的阻抗得以提高。为了提高负载的抗扰动性能,需要合理的系统设计方案,或者更合理地选择设备参数的额定值。以与电力变换器一起工作的负载为例,使用电力电子器件,如 IGBT 晶体管,或者 GTO 晶闸管,可以改进系统所吸收的电流瞬时值波形,但是这种方法造价太高。对于电动机来说,额定输出通常比要求的值略高,以便在供电电压质量较差的情况下,提高其耐用性。

为降低负载所引起的扰动,特别是针对变频器,方法较多。一般使用的方法为:运用屏蔽电缆连接电动机与变频器,屏蔽控制电缆,并在变频器输入环节中运用 RFI(射频干扰)滤波器,抵消无线电干扰。

3.2.1.1 无源滤波器

为改善电能质量,广泛采用的有 LC 无源谐振式滤波器。LC 谐振滤波器与供电电网母线并联连接(在配电板与特定非线性负载之间),这是降低电流高次谐波的传统方法,有时也用作基波无功功率的瞬时补偿。这样的滤波器通常由一系列电容和电抗串联的支路组成,如图 4.3-19 所示。

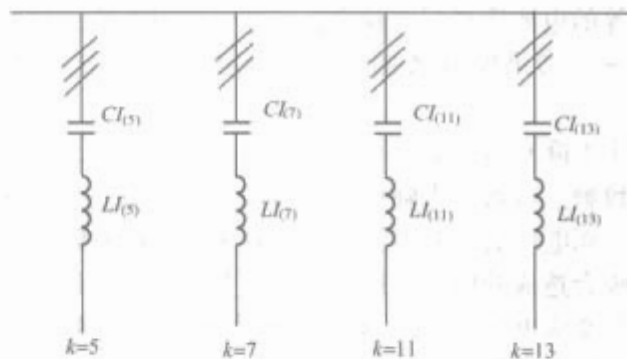


图 4.3-19 四分支 LC 谐振滤波器

支路的数目与需要滤波的谐波数目有关,在图 4.3-19 中,只考虑滤除 5 次,7 次,11 次和 13 次谐波。每条支路中,电容和电感的取值,取决于特征频率下电压的谐振条件。

在三相谐振式无源滤波系统中,特定支路的 LC 元件连接成如图 4.3-20 所示的结构。图 4.3-20 (a) 的连接,可以获得比单个电容效率更高的等效电容,但其中的电容须工作在相电压下。在与电抗有公共连接点时[图 4.3-20 (b)],电容的绝缘介于对地电压和相电压之间。这样的连接改进了电容的可靠性。图 4.3-20 (c) 所示的方案在实际中广泛被采用,它简化了滤波器的设计:所用的电抗通常接成单相的,采用空气心或者气隙可调,标准的三相电容器通常有一个公共结点。用于抑制多种谐波的滤波器构造,往往具有设计形式的可变更性,以及元器件的可替代性和方案的可调整性。因此,比图 4.3-19 所示的多支路方案更有效的设计方案是组合 LC 滤波器,其中所有的电抗元件都相同,并适用于两种或者三种谐振频率。这种滤波器的拓扑结构举例如图 4.3-21 和图 4.3-22 所示。

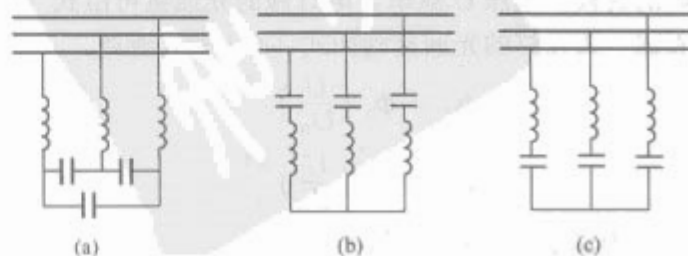


图 4.3-20 谐振滤波器中 LC 元件连接示意图

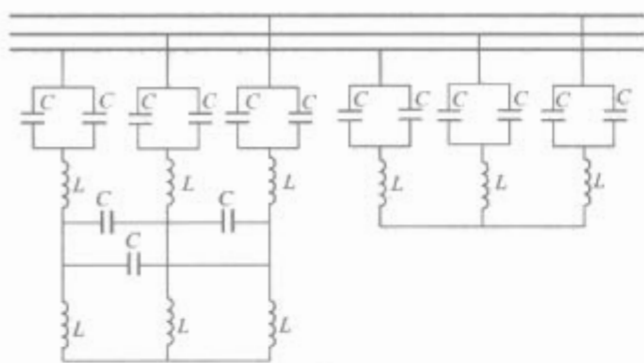


图 4.3-21 3次、5次、7次谐波联合滤波器

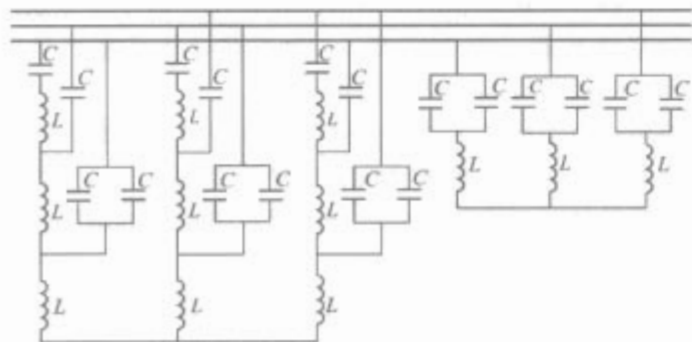


图 4.3-22 3次、5次、7次、11次谐波联合滤波器

本质上，谐振式滤波器作为谐波源的低阻抗旁路电路，降低了谐波对系统中其他负载的影响。但无源滤波器与电网阻抗形成了一个并联的谐振电路，在电网侧对某些特定频率形成谐振。由于电网阻抗呈感性，在低于谐振频率时滤波支路呈容性，因而在低于相应支路的调谐频率时，滤波器各支路与电网会在一些频率点发生谐振现象。正由于上述的并联谐振的存在，则当电网同时存在低次谐波时，便不能用LC滤波器来滤除电网的高次谐波。即，只能在特定频率处，滤除较高次的谐波，但不能滤除较宽频带内的电流谐波。另外，无源滤波器也有下述缺陷：系统对电网和负载参数的变化极为敏感，滤波效率低且电网阻抗与滤波特性关系密切。然而，无源滤波器最大的优点是：设计简单，扩展方便，即增加滤波器支路或者电容等部件较便利。

3.2.1.2 有源滤波器

采用有源滤波器，是另一种消除电压或电流畸变的方法，这里所说的畸变电流是指非线性负载从电网中所需吸收的电流。有源滤波器（APF）是一种电力电子变换器，可以产生任意设定的电流、电压的瞬时波形。有源滤波器与无源滤波器不同，它能同时对所有的谐波起作用，其任务是消除“非有功功率”。非有功功率包含高次谐波，和基波分量中的无功功率。这种滤波器没有电源，工作时从电网吸收能量，并将所产生的补偿电压或补偿电流反馈回电网。为了存储瞬时能量，使用了电容器和缓冲器。电网中定点的补偿，是为了使该点的三相电压和电流为正弦的和平衡的，且各相电压和电流的波形没有相位移。滤波器损耗的能量也来自电网。

图 4.3-23 显示了一种并联型有源滤波系统。电力晶体管换流器的作用是产生补偿非线性负载所吸收的高次谐波电流，其中，非线性负载为六脉冲三相整流器。直流电路中的电抗，用于存储可控电流逆变器所吸收和补充的电能。

有源滤波器从电网的一选定相中吸收能量，保存在“存储器”（电容、电抗或者蓄电池）中，需要时再反馈回上述那一相的电网。该操作过程的速度影响到“存储器”的容量，也就是能量存储元件。由此可见，在有源滤波器与电网之间有瞬间的能量交换。这种交换是相互的，且平均值不变，即恒等于零（忽略损失）。否则，有源滤波器需要与附

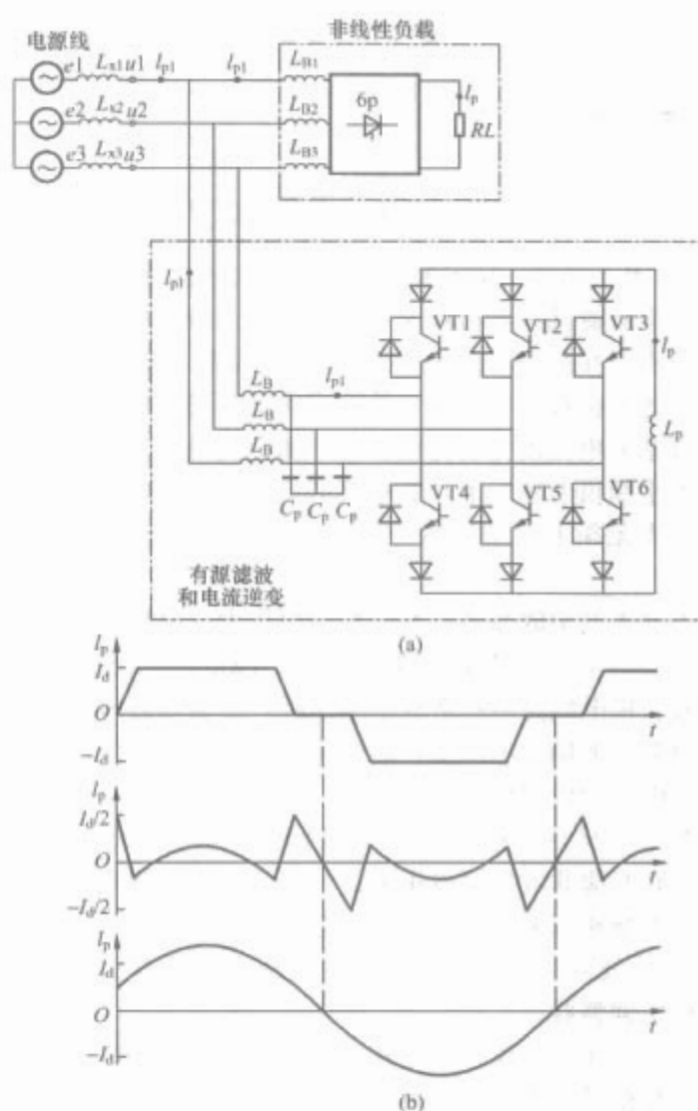


图 4.3-23 带有有源滤波器的非线性负载畸变功率补偿

(a) 系统示意图；(b) 电流波形

加电源或者有源负载相连。

有源滤波器，根据其和电网相连的方式，可以分为并联式和串联式。据此，有源滤波器（补偿器）可以称为并联式或者串联式，有源滤波若是并联的，则是电流型的，或者串联的，也就是电压型的。值得一提的是，若这两种基本结构组合起来，就形成了串-并联式有源滤波器。

并联式有源滤波器，通常的构造为基于脉宽调制的三相逆变器。选择适当的高频调制频率，按照 20Hz 直至 30kHz 的顺序，可以补偿直至 19 次谐波造成的畸变。实际应用中两种逆变器：电流源型逆变器（电感作为储能元件）和电压源型逆变器（电容作为储能元件）。

简化的串联式有源滤波器和并联式有源滤波器的结构框图，分别如图 4.3-24 和图 4.3-25 所示。

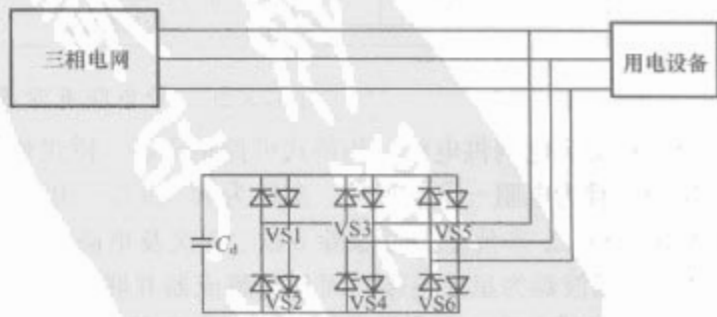


图 4.3-24 并联式有源滤波器

图 4.3-24 所示的系统，实际上是一种三相三线并联型有源滤波系统。其中，逆变器的作用为，以瞬时无功功率理论为基础，通过与标准正弦波形的对比，形成补偿电流。电容Cd的功能为储能，用于平衡负载所吸收功率的脉动性。

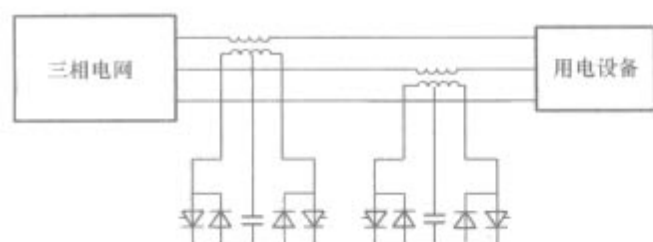


图 4.3-25 不对称系统的串联式有源滤波器

并联有源滤波器可涉及负载所吸收的所有电流分量。使畸变电流只在负载电路和受控补偿电流源（滤波器）中流动，因此不会加载于电网，从而完成了下述三项任务：①补偿负载基波电流的无功分量；②平衡电网负载，甚至补偿负载在不平衡供电电压下，其电流的反相分量；③滤除高次电流谐波而无须考虑电网的阻抗，这是无源滤波器所无法实现的。

电网中的串联滤波是将受控的电压源（电压型串联有源滤波器）与电压源串联起来。因此，源电压与滤波系统之和，减去供电线路阻抗造成的电压降，即为负载电压。将测得的负载上的畸变电压值，减去理想正弦供电电压值，就是滤波器的一个设定值。

图 4.3-25 所示的串联有源滤波器可以进行 100% 脉宽调制。串联有源滤波器可以用来：①补偿供电线路电抗的电压降；②平衡和调节供电线路上的电压（包含降低和稳定电压骤降）；③滤除由特定电压源或者负载产生的电压谐波；④作为相位调整器。

有关并联、串联和串并联式，并应用电压、电流逆变器有源滤波器设计方案，在很多文献中有详细的描述。这些文献也包括相应的串并联滤波的理论基础，各种结构有源滤波控制器的结构框图，有的还给出了利用电脑仿真技术完成的研究和实验结论。

有源滤波器中一部分的损耗功率，与系统元件（如：半导体器件）的电压降有关，另一部分则与器件的开关损耗有关。开关损耗在有源滤波器中占显著地位，与开关设备的开

关操作频率成正比。但频率越高，对快速畸变的补偿也效果越好。实际工作中，需要在补偿质量与系统能量损耗之间寻求一个折中。

有源滤波器的初投资和运行成本是一个首要问题。有源滤波器中的四个部分分别为：无源器件（电容、电抗），半导体功率器件（IGBT，GTO），电子（微处理器）测控设备，以及辅助元件。选择元件时，需要考虑功率与电压等级。电子测控设备的成本以及人工费用，对于低功率滤波器（直至 10kW）的总成本有重要影响。对用于低压系统（直至 0.4kV）的中等功率滤波器（直至约 250kW）而言，半导体功率器件对系统总的价格有决定作用。对于中压系统中的大功率滤波器（到 MW 级），除了半导体功率器件的价格，无源辅助元件的价格也很重要。

如今，由于半导体功率器件技术，以及微处理计算技术的迅速发展，可以获得能够消除各种畸变的有源滤波器。唯一的问题只是寻找滤波器成本与运行效率之间的最佳关系。

3.2.1.3 混合型滤波器

如上所述，电源阻抗对无源 LC 滤波器的特性有影响。即在包含电源阻抗和并联 LC 滤波器的电路中，可能会产生谐振现象。然而，有源滤波器却没有上述缺陷，但需要安装更大功率的设备，提高了制造成本。为了避免有源滤波器、无源滤波器使用中的不足之处，提出了混合型滤波器的概念，包括了有源滤波器和谐振 LC 滤波器。这种方法消除了上述无源滤波器的缺陷，而有源滤波器所需的功率也较低（尤其是在涉及中等功率和大功率系统时）。LC 滤波器越来越多地用作混合滤波系统中的可调无源元件，大大降低了有源部分的使用功率和生产成本。尤其是在大功率系统中，单纯的有源滤波器往往造价更昂贵，结构更复杂。

混合滤波器既可以在并联型，也可以在串联型有源滤波系统的基础上构建。图 4.3-26 显示了补偿电网中电流高次谐波的三相混合滤波系统结构框图，其中，有源滤波器为与电网串联连接。

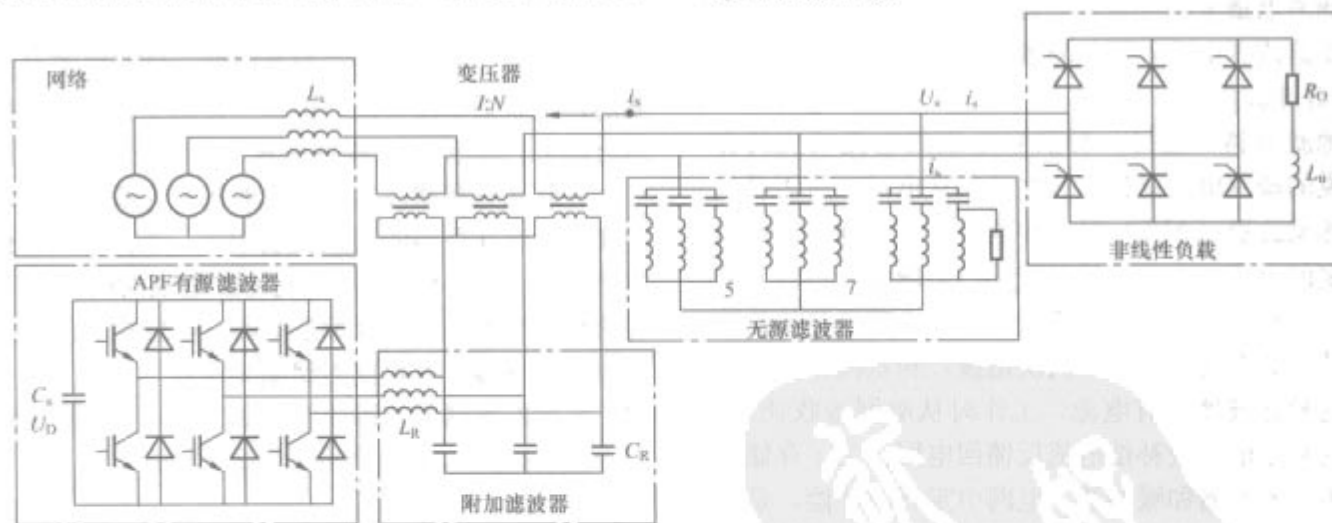


图 4.3-26 带串联有源滤波器的三相混合滤波系统示意图

由三相交流电网供电给三相桥式可控整流器。桥式整流器连接的负载为电阻—电感性的，参数为 R_0 和 L_0 。供电电网阻抗由电感 L_s 来代替。可滤除 5 次、7 次及更高次谐波的无源 LC 滤波器为星型连接，而且与整流器并联。三相有源滤波器，本质上为一个附加电压，接在三个变压器的原边绕组上，变压器的副边绕组则与电网串联。

有源滤波器通过附加的低功耗元件 L_R 和 C_R 与变压器的一次绕组相连， L_R 和 C_R 的作用是防止电压突增。图 4.3-26 所示的系统，首先是能够有效抑制电网电流中所包含的低次谐波。抑制系数随着谐波次数的增加而降低，即 5

次电网电流谐波，抑制系数为 8，而 19 次电网电流谐波，其相应的抑制系数只是略大于 2。

将各种有源滤波器和无源滤波器用不同方法结合起来，可以得到多种类型的混合式滤波器。一般地，混合式滤波器（包括其控制系统）的系统框图，主要有以下几种：①将附加串联式电压源，连接至电网；②将附加串联式电压源，连接至无源滤波器；③将附加串联式电流源，连接至无源滤波器；④附加电流源，并联至单条支路的无源滤波器。参见图 4.3-26。

有源滤波器与无源系统连接后，有源滤波器所包含的变

换器中,电压和电流就可以降低,另外,视在功率也随着降低,可以降低成本。

可见,混合滤波系统吸收了电网中的无功分量。作为滤波—补偿系统,混合有源滤波器的工作原理是,既作为高次谐波的滤波器,又作为负载电流中无功分量的补偿器。关于混合滤波器从电网中吸收的无功电流的控制,可以通过基于晶闸管的电流控制器,或者采用多元无源LC滤波器。

3.2.1.4 谐波抑制变压器

采用谐波抑制变压器是除了滤波器外较常用的一种限制电网中高次谐波的方法。这种变压器通过增加从电网变换而来的电压的脉冲数目,使得从电网上吸收的电流,其瞬时值波形得以改进。例如,在连接变压器的二次绕组时,二次绕组之一用星型连接,其他的用三角形连接,则可以降低从电网上吸收的电流的谐波含量。

基于变压器的电压滤波器,可以把对电压波形畸变或电压脉冲敏感的用电设备与电网隔离开来,确保几乎是在正弦电压条件下工作。基于变压器的电压滤波器,变压器每相的铁心与磁轭之间的交叉部分,比功率变换器中应用的典型的铁心要大,其一次绕组与二次绕组是圆柱形的线圈绕组,或者圆线圈组成的圆柱形绕组。若原边电压的相绕组为三角形连接,二次绕组成Z字形连接,这样是有利的。对于每相绕组,选择合适的匝数,以便在3.5~6范围之间得到变压器的铁心质量与总质量的比率。每个一次绕组与二次绕组线圈,由薄铜片屏蔽起来,所有的屏蔽连接在一个公共点。

由于变压器这种结构,变压器铁心与磁轭之间的磁感应很小(0.20~0.25T)。变压器工作在饱和特性曲线线性部分的起始处,是线性的用电设备。另外,变压器自感可以有效地过滤供电电流和电压。上述变压器可以确保线性负载吸收的电流和电压波形为正弦波,而且可以使得用电设备与电网隔离开来。基于变压器的电压滤波器还可以有效地抑制电压脉冲,其值是电网电压脉冲的几倍至几十倍。

由于对于干扰敏感的许多负载都工作在220V,上述基于变压器的滤波器可以替代目前运用较多的降压变压器。这种方法的成本,等于传统变压器与特殊方式制造基于变压器的电压滤波器两者费用之差。但需要强调的是,应用基于变压器的电压滤波器,并不能降低电压偏差和频率偏差(有效值与额定值的差值)。采用特殊的系统方案,可以有效地降低上述偏差,例如,将系统分割成有独立电源的各个子系统,或者使用机电变换器。

3.2.2 船舶电力系统中电能质量的改善

同步发电机是船舶电力系统中最基本的电源,可以认为其输出为正弦电压,而电网中的非线性负载将导致谐波电流。特别是在换向过程中,将出现较高的谐波含量,但具有衰减特性。

逆变型轴带发电机组在发电时也会产生扰动,即产生电能质量问题。起动轴带发电机时,需要同时起动与电网并联的滤波器,其作用是降低原边扰动直至允许范围。

3.2.2.1 带轴带发电机组的船舶电站

(1) 带轴带发电机组的船舶电站的构成。图4.3-27所例示的船舶电站示意图中, S_j ($j=1, 2, 3$) 为开关,GS为独立发电机,I为逆变器,HF为谐波滤波器,SG为带有整流器的轴带发电机,ME为主机,SC为同步补偿器,G为发电机,AE为柴油辅机。轴带发电机是靠与主机直接耦合的三相发电机发出电,再经由直接安装在上述的发电机上的整流器,产生了直流电。直流电经过在三相逆变器被交流化处理,变成三相交流电,其基频 f_0 与电网电压的频率一致。同步补偿器(SC)与逆变器输出相连。逆变器频率值

与同步补偿器电压值由电子控制系统控制。轴带发电机与独立发电机组(GS)并联起动后,谐波滤波器(HF)连接至汇流排,其作用是消除波形畸变。

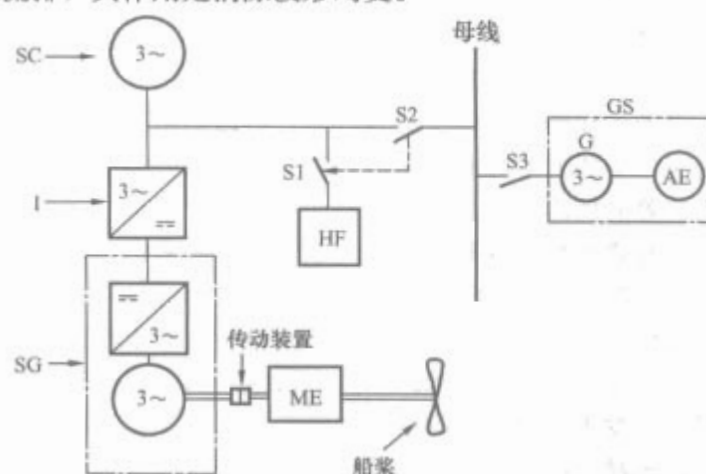


图 4.3-27 安装有轴带发电机组的船舶电站示意图

(2) 谐波滤波器介绍。所用的谐波滤波器框图如图4.3-28所示。

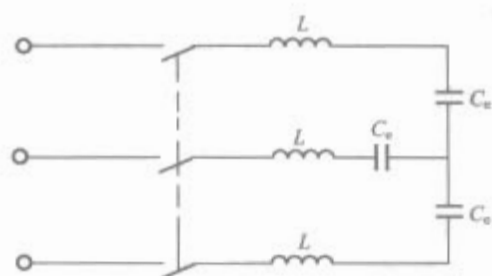


图 4.3-28 三相无源 LC 滤波器的示意图

图4.3-28显示的等效电容 C_e （电容模块），由若干个并联的三相电容器组成。这种模块的结构如图4.3-29所示。

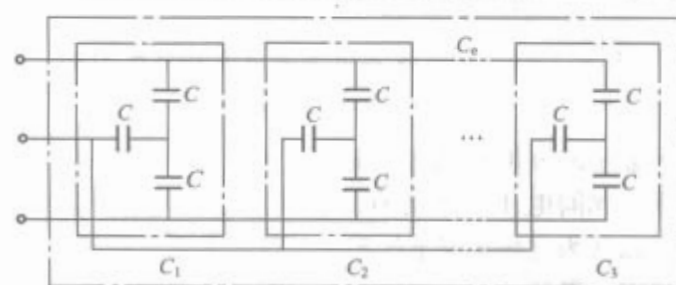


图 4.3-29 带有等效电容 C_e 的模块连接图
——谐波滤波器中的一部分

选择一定数量作为模块元件的三相电容器,从而得到所需谐振频率,使抑制特定次谐波的效果最理想。由于能量需求和高稳定性要求,需要对电容器进行特殊的设计。一种符合要求的方案是把一些选定的低容量电容并联起来,达到单电容器 C 的效果(图4.3-29)。这种电容器 C 的内部结构如图4.3-30所示。特殊组成电容 C_{ci} , $i=1, 2, \dots, n$,用电线“b”连接起来,等效于断路器电路。若超出允许电流,导致电极之间短路,而相关的导线“b”熔断后,故障电容就从电路中断开。

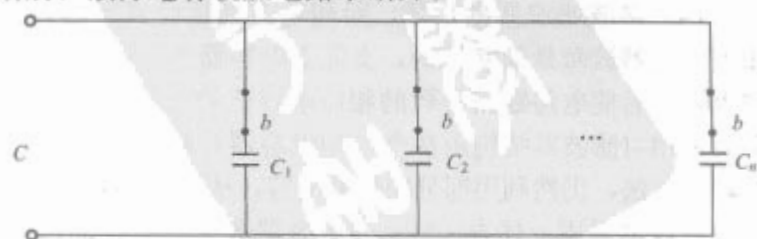


图 4.3-30 单相连接的电容器 C_{ci} 内部组成示意图

(3) 部分运行结果的分析。对带有轴带发电机组的船舶电力系统运行过程进行研究分析,发现系统中一部分设备

(如:许多设备的驱动电机)能长期正常运行,但也有些设备在没有任何可预测性的情况下,发生了故障。有记录的故障也包括随机关闭整个全球卫星通信系统, GMDSS (全球海难救助与安全系统)。但若改为由独立发电机组供电,而停止轴带发电机(及其相关系统)的运行,则之前报告需维修的设备,在改变后的供电条件下,可以正常工作。故障分析表明,上述的情况有时是由与轴带发电机一起工作的谐波滤除装置的故障引起的。

谐波滤除装置的基本元件为电容器,若考虑到其老化过程以及对故障的敏感程度,可以认为是最薄弱的环节。随着时间推移,总的电容值发生变化,使得谐振频率转为更高的频率。这样就不能正常地滤除低次谐波,而低次谐波会使得电网电压发生畸变。电网中出现畸变电压,加剧了各种设备的运行问题,特别是给定系统中安装的非线性负载会出现额外的畸变。滤波器中电容器的故障,通常是不对称的,对电力系统及相应负载会产生不利影响。例如,加速了电机机械部件以及电机驱动设备的磨损,引起更大的功率损耗,埋下了安全隐患。

图 4.3-31 中,显示了滤波器中电容部分损坏时,轴带发电机运行过程中,示波器测得的(船舶电网)主汇流排电压波形。

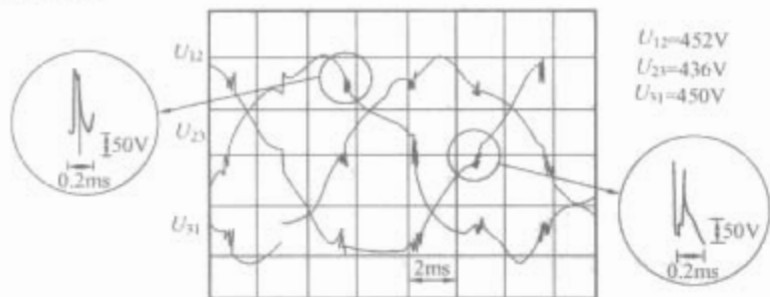


图 4.3-31 在滤波器中部分电容损坏时船舶电能质量畸变电压波形图

所显示的波形是通过两通道 200MHz 带宽的示波器进行记录,相间电压显示的有效值由数字式电压表测量。因此,可以认为这种状况下的测量,技术上而言具备了较高精度。值得一提的是,若测量过程中的系统误差恒定,测量结果便可用于正确评估上述现象(根据各自的特征)。

电网电压的波形图可用于区别两种影响船舶电力系统的畸变类型:滤波器故障导致的低频畸变;电网中变流器换向过程导致的高频畸变。这两种类型的畸变,只能各自独立地被滤除。低频畸变(谐波频率是电网基频的好多倍)用高次谐波滤波器滤除,而消除高频畸变所用的是高频滤波器。但由于运用了电容值相对较小的标准电容器,高频滤波器的故障问题已不再常见。唯一的问题是要检测出过于严重的高频畸变,尤其是船舶在运行很多年后。高频畸变过于严重时产生的问题首先是对各种现代化系统运行造成的问题,如采用微处理控制器后,该控制器对这种畸变的高度敏感。

(4) 谐波滤波器的诊断。船舶电力系统经多年运行后,谐波滤波器故障是最常见的,实际上电容器老化过程以及断路器熔断后使电路断路导致的相应电容值的变化。因此,目前有采用对滤波器结构由数个三相电容器并联连接组成电容模块的方法,仍然利用部分损坏的电容,从而降低维修成本。

滤波器采用上述方法时,对电容器选择的举例如下。

第一步是测量那些特定电容的容量,并将这些电容连接起来,以获得特定相位的合成电容,尽量对称。然后,串联上去补充电容,这样滤波器的合成电容能够在最佳性能下抑制谐波分量。

运行时,三相电容器特定电容值的测量可以用图 4.3-32 所示的测量系统来完成。

如图 4.3-32 所示,在运行时测量三相电容器特定电容值 C_{1k} , 必须在端点 1, 端点 2 和端点 3 处,测量合成电容值 C_k , 由特定频率的电压 U_k 通过限流电阻 R (例如一个加热器)给 C_i 供电,通常用 220V 的交流电网。电压需要在相关的接线端测量,并测量电流强度。每次端点组合后需重复测量。合成电容值可以通过式 (4.3-86) 来确定

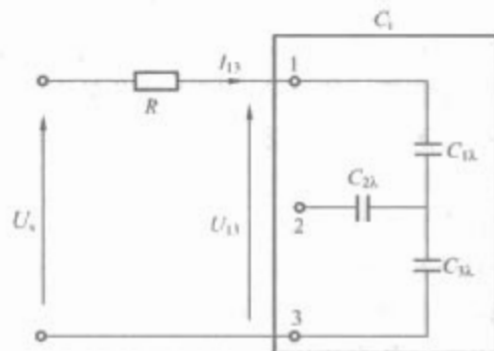


图 4.3-32 三相电容器的电容值的测量系统

$$C_k = \frac{I_k}{2\pi f U_k} \quad (4.3-86)$$

其中: $i, k=1, 2, 3$ 。

对于三角形连接的电容器,其特定电容值可以由下列公式确定

$$C_{1\Delta} = \frac{2C_{12}C_{13}C_{23}}{C_{12}C_{23} + C_{13}C_{23} - C_{12}C_{13}} \quad (4.3-87)$$

$$C_{2\Delta} = \frac{2C_{12}C_{13}C_{23}}{C_{12}C_{13} + C_{13}C_{23} - C_{12}C_{23}} \quad (4.3-88)$$

$$C_{3\Delta} = \frac{2C_{12}C_{13}C_{23}}{C_{12}C_{23} + C_{12}C_{13} - C_{13}C_{23}} \quad (4.3-89)$$

然后,为了减少繁琐的计算,用下列已知的公式,计算等效的星型连接的电容

$$C_{12\Delta} = \frac{C_{1\Delta}C_{2\Delta}}{C_{1\Delta} + C_{2\Delta} + C_{3\Delta}} \quad (4.3-90)$$

$$C_{23\Delta} = \frac{C_{2\Delta}C_{3\Delta}}{C_{1\Delta} + C_{2\Delta} + C_{3\Delta}} \quad (4.3-91)$$

$$C_{31\Delta} = \frac{C_{1\Delta}C_{3\Delta}}{C_{1\Delta} + C_{2\Delta} + C_{3\Delta}} \quad (4.3-92)$$

已知特定的星型连接电容器的电容值,可以选择特定相位的连接,以使负载对称。实际运行过程中,还应考虑到电容器本身的机械构造所带来的一些限制。最后,需要将电容器并联起来,用以补充滤波器的电容值,使其在技术上达到最佳值。这样,可减少维修替换的电容器的数量,从而可以大为降低滤波器的维修成本。

3.2.2.2 带变流器子系统的船舶系统

高次谐波对于带变流器子系统的船舶电力系统的不利影响,可以通过下列方法来限制:①对船舶电力系统进行分区,即电力系统被划分成若干个由独立电源供电的子系统;②采用滤波器来限制高次谐波;③采用隔离变压器;④采用机电转换器。

(1) 对船舶电力系统的分区。SOLAS 公约规定,功率大于 3MW 的船舶电站,其主配电板汇流排须分成几个独立的区。这种方法经常应用于安装有电力推进器的系统,因为电力推进器能引起系统中电压和频率较大的变化。电站主配电板的结构图如图 4.3-33 所示。图中, M 为推进器的电机, SG 为轴带发电机, G1、G2、G3 为独立发电机, Tr1、Tr2 为 380V/220V 变压器, ME 为主柴油机, AE 为辅机。

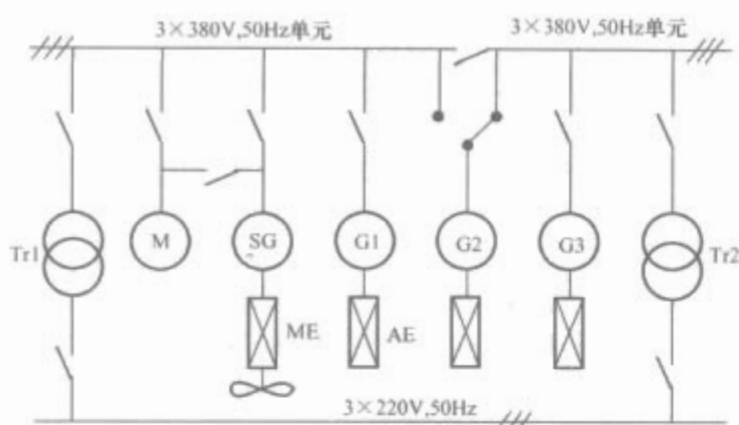


图 4.3-33 船舶电站主配电板结构示意图
(主汇流排须分成几个独立的分区,使其能通过独立的子系统向推进器供电)

另外,这种方法也适用于电力系统中包含有产生扰动的设备,如电力电子变流器;同样也适用于输出功率较低的系统,如信号系统的供电系统。

(2) 滤除高次谐波。尽管目前在船舶电力系统中还没有有源滤波器或者混合型滤波器的应用,在不久的将来,必定会实现这些滤波器的应用。一方面,这与船舶电力系统的发电机和负载的功率相对较低有关;另一方面,船舶系统中安装了许多对供电电压畸变较敏感的重要设备。采用有源滤波器或者混合型滤波器,可以将那些“安全”设备单独地安装在畸变较轻微的子系统中。对有源滤波器或者混合型滤波器的选择,取决于安装在“安全”子系统内的负载容量。

(3) 隔离变压器和机电转换器。为了避免大功率晶闸管变流器吸收非线性电流的不利影响,船舶通用电网通常在电站的主汇流排上安装有变压器(见图 4.3-34)或者变换器(见图 4.3-35)。这为在电力推进系统和电网中采用不同的电压,提供了便利。即对于大功率的推进设备,电站常用 660V 或者 1000V 的发电机,而通用电网目前最常用的是 380V 电压。

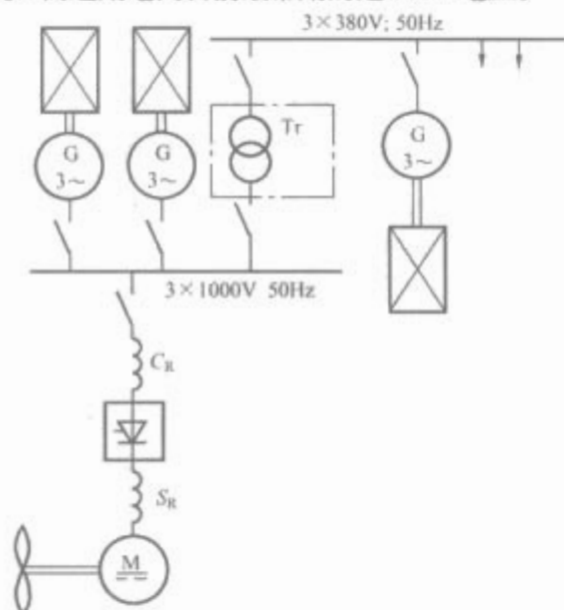


图 4.3-34 由主汇流排经由变压器 Tr,换向电抗器 C_R 和平波电抗器 S_R 向船舶通用电网 ($3\times 380V$ 50Hz) 供电

(4) 其他设计方案。船舶主电力推进系统使用双工系统或者双电源系统,来降低系统中因带有变流器子系统而产生的干扰。

例如,变流器中的晶闸管整流器(图 4.3-36)由其中一台变压器供电,变压器二次绕组为星型连接,另一个晶闸管整流器由另外一台变压器供电,变压器二次绕组为三角形连接。这种方法可以改变两个晶闸管整流器的供电电压相位,从而降低注入电网的高次谐波。采用这种方法,可以用较小

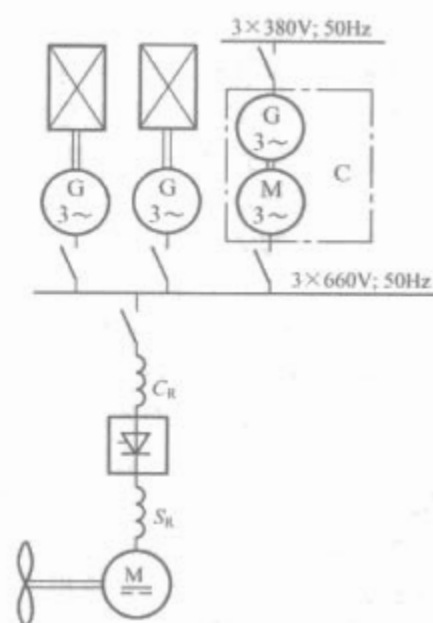


图 4.3-35 由主汇流排经由转换器 C,换向电抗器 C_R 和平波电抗器 S_R 向船舶通用电网 ($3\times 380V$ 50Hz) 供电

容量的滤波器来把 6.6kV 主汇流排上的高次谐波限制在允许的范围內。

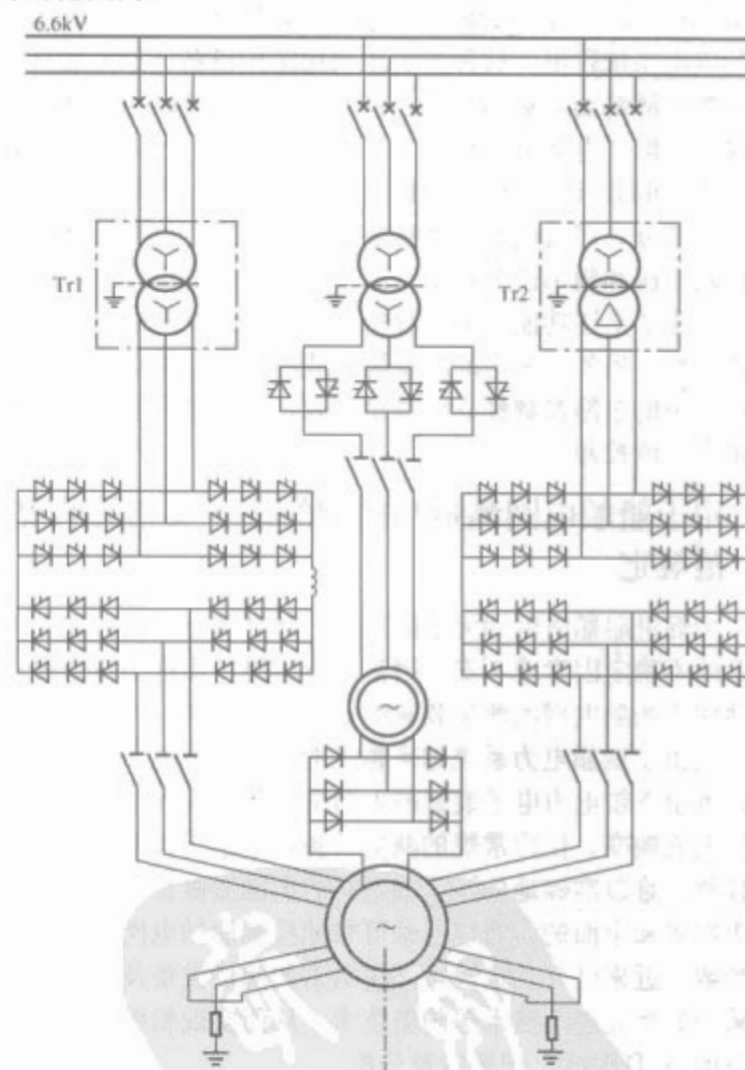


图 4.3-36 应用于船舶主电力推进系统的频率变换器的连接图——由 Alsthom 制造的“同步”型

在应用于交流驱动系统的其他方法中,应用了几对反相并联的变流器组成的直接频率变换器(周波变换器)。这样的系统应用于船舶主电力推进系统中,形成“交—交变频推进”型,ABB 公司有相应的产品。

除了产生扰动,变流器对系统电能质量的影响还在于过电压以及无线电高频干扰(RFI)。无线电高频干扰在带宽 150kHz~30MHz 之间时,与功率半导体器件(二极管,桥式整流器中的晶闸管,以及逆变器中的功率晶体管)的运行

有关,通常称为“开关干扰”。为了避免变流器子系统,特别是频率变换器造成的这种扰动,系统中采用屏蔽电缆来连接电动机的变流器与 RFI 滤波器(阻止无线电高频干扰),以及无源 LC 滤波器(削弱扰动)。限制频率变换器中间电路的电压脉冲,可以降低扰动电压,这可由设计合理的 LC 滤波器实现。频率变换器的输入电路中使用变阻器,可以限制过电压。

3.2.3 船舶电力系统电能质量控制的展望

对于船舶电力系统的设计者和使用者,即船舶操纵者来说,控制电能质量是一项挑战。针对船舶电力系统中与电能处理过程相关的扰动产生的机理,有源和无源的方法都可以用来控制电能质量。电能质量控制的观念,应该理解为消除和限制相关扰动作用的技术方法的应用。毫无疑问,这些方法目前主要是与船舶电力系统的变流系统相连的船舶电网高次谐波滤波器(目前主要是无源滤波器)的应用。但是,目前还没有有关有源和混合型滤波器在实船中的应用信息。

SOLAS 公约推荐的另一种方法是,采用适当的主配电板结构,主配电板应该分成若干个独立的区域。根据公约的规定,船舶电站的额定功率大于 3MW 必须采用这一设计:对供电电压参数变化较敏感的设备(如海难救助与安全系统 GMDSS),以及对船舶安全运行极其重要的设备,应该由独立的供电系统供电。这种方法比采用防护设备,如添加高技术含量的滤波器,更加经济。将来可以大胆地运用特殊的测量仪器,即“电能分析仪”,尽管这不是改进电能质量的直接方法,但分析仪可以作为控制电能质量的多参数自动化系统的一部分,因其电能质量参数的测量数据可以被处理并用来控制电压和频率调节系统,以及产生切断特定发电机组的信号。除了上述功能,电能分析仪还可以监测船舶电站中的电流参数。另外,先进的测量模块能够作为船舶电力系统运行过程中的电网参数独立的测量仪表,用于电能质量参数的测量和电流控制。

4 用于船舶电网测量与控制的设备及相关的规范规定

为促进船舶电网的无故障运行,就必须对电网在船舶环境下的不稳定因素或不安全因素进行监测,而这与符合要求并适用于船舶电网的测量装置的选择直接相关。

但由于船舶电力系统越来越多地应用电力电子设备与系统,也由于带电力电子装置的大功率负载的投入运行而引起电压电流畸变,使得常规的测量设备,即基于机电转换原理的仪器,难以准确地检测船舶电网的电能质量参数。为了获得更准确和全面的测量信息来可靠地检测船舶电网的电能质量参数,近来已开始在设计船舶电网的测量设备及测量系统时采用如微处理器技术等的新技术,从而实现船舶电网畸变信号的 A/D 转换,记录以及分析。

另外,船用装置和设备在设计方面与陆地上使用的同类型装置有所不同,这是为了适应船舶运行环境,避免航行的危险。例如将陆上所采用的设备用于船舶系统时,使用不同的绝缘材料,不同的制造工艺,以及专门设计的屏蔽和接地方式,有时还须采用特制的减震设施或轴承。对于已在陆上应用的电网测量系统,同样须进行调整来适应船舶电网,而且船舶应用也已越来越朝着集监测,报警和控制于一体的测量与控制系统的方向发展。

尽管如此,迄今仍缺少清晰明确的对船舶电网参数的测量与控制的统一的方法,也没有完全可靠的用于船舶电网的测量与控制设备。船舶电网采用的测量仪器都是根据船东的

决定而选择的,这些仪器的设计只能满足最低的船舶运行和精确的要求。通常选择测量控制设备最基本的标准一直是性价比,这常常会限制船舶电网的安全高效运行。

值得一提的是,船舶电网的结构组成以及运行的安全规范是由各船级社制定的。各船级社规定了安装在船舶上的测量与控制设备的功能必须符合处于船舶气候环境,机械环境以及电磁环境下的使用标准。也必须符合船舶电网的表征船舶电力系统的运行特性的参数在允许的范围内发生变化情况下的使用标准,包括发电机组(主发电机和应急发电机)在单独运行或并联运行时的调节。

4.1 船舶电网参数测量装置

4.1.1 单参数测量装置

4.1.1.1 频率的测量

船舶电网中频率的测量,通常为采用有限测量量程,基于直接偏差法的频率表。振动式表[见图 4.3-37(a)]和指针式频率表[见图 4.3-37(b)]是最常用的。随着模拟技术以及数字技术的发展,频率表已有了更精良的方案。值得一提的是,陆上大量使用的电子频率表,只有一部分方案通过鉴定并获准应用于船舶。

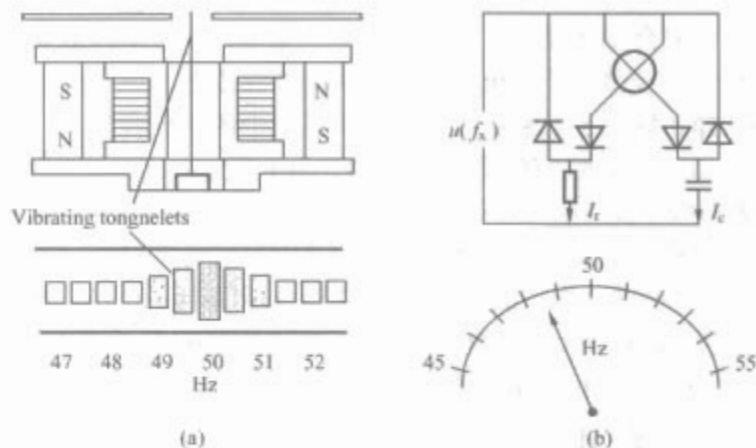


图 4.3-37 应用在船舶上的频率计
(a) 震动式频率表; (b) 指针式频率表

数字式频率表中,图 4.3-38 显示了一种基于周期测量方法的应用实例。频率表中,输入信号 IN1 和 IN2 (220V AC/380V AC/440V AC) 各自的频率待测,这些信号传输至有光电隔离电路的成形系统(FS1 或 FS2)的独立输入端。已成形信号的频率在 μ PC 微处理控制器中进行测量。该控制器由输入/输出端口系统 B、Z-80 微处理器、EPROM 可编程存储器组成。 μ PC 中形成的信号控制 LED 组成的指示系统 IS1 和 IS2。测量的主要部分通过微处理器的算法来执行。

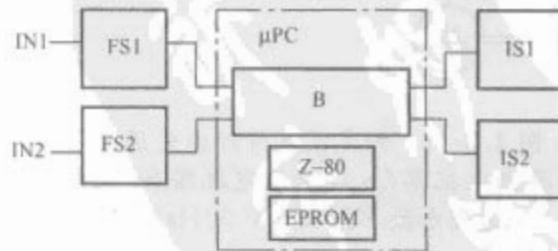


图 4.3-38 双系统微处理器频率表框图

因船舶电网的频率相对较低,则将周期测量法应用于船舶电网电压频率的测量运算。电压值跃过零电位的瞬间,定时门电路打开,计算脉冲数 N 和标准频率 f_N ,一个周期(或者多个周期)后电压值跃过零电位的瞬间,门电路关闭。待测频率 f 等于

$$f = \frac{f_N}{N}$$

这种仪表的优点是：无需校准测量线，与模拟式电子频率表相比结构简单，且抗干扰性能好。根据其显示方式，其最大的频率测量误差为

$$\delta_f = \sqrt{\delta_E^2 + \delta_{NS}^2 + \delta_{IN}^2} \quad (4.3-93)$$

式中： δ_E 为显示误差； δ_{NS} 为离散化误差（一般地，测试信号含5个周期）； δ_{IN} 为标准信号发生误差（由石英晶振的稳定性决定）。根据实际生产的系列产品，误差值低于0.3%。

4.1.1.2 相位系数 $\cos\varphi$ 的测量

工程实践中通常认为相位系数的测量，如测量电流与电压之间相位差的余弦值，是船舶电力系统中采用的一种标准测量方法。等同于有功功率因数 λ 的测量法，其定义为有功功率 P 与视在功率 S 的比率。但这源于对船舶电网中电流和电压波形未畸变的假设。

相位系数测量法采用基于商数变换器的仪表或者电磁式仪表。仪表中装有商数转换器、电动力转换器或者磁力转换器，含一个静止的电流线圈和两个运动的线圈组成一个电压回路。电压线圈中的电流，根据其在电网中的连接点，相互以 $\pi/2$ 或者 $2\pi/6$ 角度移相。此系统中指针的偏转，在很宽的电流和电压的范围内，取决于注入静止线圈中电流与运动线圈中的电压之间移相的幅度大小。电磁式的仪表 [见图 4.3-39 (a)] 安装有专门设计的电动机械式转换器，有三个电压线圈和一个电流线圈，用于磁化一个转动机构的圆柱芯。这样设计的四象限仪表有 360° 的圆弧刻度 [见图 4.3-39 (b)]，通过吸收电网电能或者将电能馈入电网，来测量不同的感性和容性负载下的功率因数。仪表中指针的位置由负载电流相对于参考电压的相位差决定。

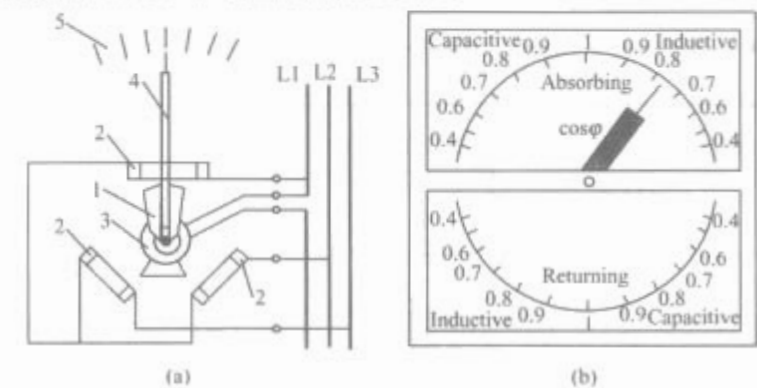


图 4.3-39 电磁式相位仪
(a) 连接系统；(b) 仪器刻度盘

1—转动机构；2—静止电压线圈；3—静止电流线圈；
4—指示器；5—刻度盘

将这种仪表应用于船舶电网，不仅对机械和电磁干扰较敏感，也难以利用其测量结果达到自动控制和记录的目的，故其使用有限。另外，所用的测量仪表不能直接测量定义为 P/S 的功率因数 λ ，而 λ 对分析船舶电网中常出现的波形畸变非常重要。

4.1.1.3 电流、电压、功率的测量

船舶电网中的电压，通常由直接接在主配电盘和应急配电盘汇流排上的电压表，直接测量。一般只用带开关的一个电压表，可以测量每一相的电压。电流的测量是由安培表借助电流转换器完成，需要使用好几个电流表来测量各相的电流值。由于结构简单，电磁式仪表常用来测量电压和电流。

在用于配电盘的仪表中，有的带有继电器系统，可传输电压或电流超过限定值的信息。测量系统由两个独立模块组成。这种方案的原理框图如图 4.3-40 所示。

电压 u （或电流 i ）作为转换器（ U/U ，或者是 U/I 、 I/U 、 I/D ）的输入，输出则是标准的直流电流或电压信号，

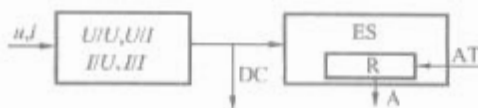


图 4.3-40 电压电流测量系统框图

与转换器（ U/U ，或者是 U/I 、 I/U 、 I/D ）输入信号有效值成正比。这些信号同样可在外部测量和控制系统中使用。该模块通常作为配电盘仪表，安装于显示系统（ES）中，ES 作为测量值显示系统，由磁电转换器实现。依靠外部电位计，可设置报警门限值（AT），超出门限值则继电器的输出状态（A）改变。在显示系统（ES）的面板上，可以显示报警门限值的设定值。所测量的电压值和电流值分别经过电压互感器和电流互感器后，施加到转换器（ U/D ）的输入端。

有功功率和无功功率的测量，通常由电动式或磁力式仪表配合电流、电压变换器来完成。电流流经静止的电流线圈产生磁场，在电流与电压成正比处，放置一个运动线圈。若电压为正弦波形且电流为同频率下的正弦波形，指针的偏转与线圈中电流的有效值、相位系数（ $\cos\varphi$ ）成正比。此处， φ 是上述两个线圈的电流之间的相位角。由于各个环节的频率不同，线圈中电流的畸变不会引起指针转动部件附加的转动动量。然而，还有其它方法设计的模拟式或数字式变换器，可将有功功率和无功功率处理成与电压或电流成正比的信号。

4.1.1.4 绝缘电阻的测量

船级社对船舶电网电缆的绝缘电阻具有相关规定。一般地，船舶电缆与船体间的绝缘电阻值不应小于表 4.3-6 给出的值。

表 4.3-6 船舶电缆与船体间绝缘阻抗的最低允许值

电路选定	电网电压中的电路绝缘阻抗的最小值		
	125V 以下	125~500V	超过 500V
供应照明用户	0.3	1.0	—
供应动力用户	—	1.0	2000Ω 每 1 个额定电压伏
供应内部交换系统	0.3	1.0	—

同时，对于主配电板或应急配电板，应该为每个网络或独立系统安装一个通用变换装置或独立的设备来测量绝缘电阻。此外，由测量设备绝缘电阻 R_{in} 感应的流入船体的电流，任何情况下都不能超过 30mA。同样，应提供视觉警报和声响警报，来指示船舶电网中的绝缘电阻值的不正常下降。船舶中无人驾驶机舱，集控室也应该装有这样的报警装置。故三相电网中，应用了两种测量绝缘电阻的系统：一套转换装置 [图 4.3-41 (a)] 以及另一套直接测量漏电流的装置，通过整流器与电网隔离开 [见图 4.3-41 (b)]。

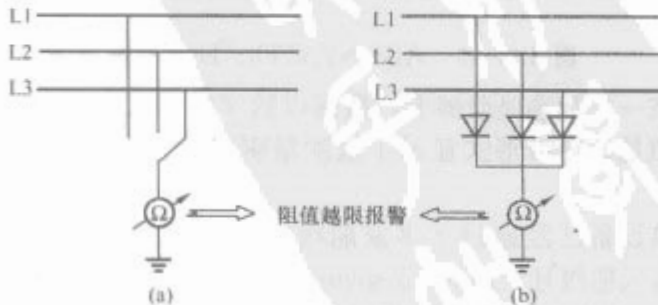


图 4.3-41 船舶电网中绝缘测量系统示意图
(a) 和船体间的每一相的绝缘阻抗测量；(b) 漏电流测量

使用外部电压源（直流），可大大提高绝缘电阻测量精度。将电感 L 串联到电路中是为了限制流入设备的交流电。

(见图 4.3-42)

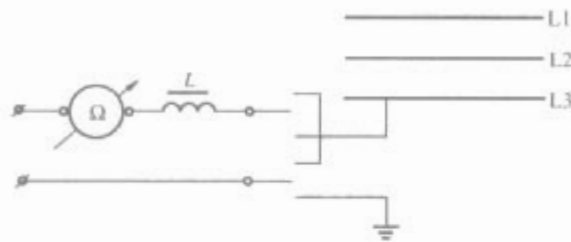


图 4.3-42 用在三相电网中的带有外部电压源的绝缘阻抗测量系统的示意图

4.1.2 多参数仪表

4.1.2.1 陆上电力系统多参数仪表简介

电网参数可选的复杂测量系统，可借助多参数变换器来实现。该系统能现场直接显示测量结果，也可以远距离传输测量信息。以电网参数配电盘仪表 MPS-10 为例。它由 LUMEL 生产，是测量三相电网参数的数字化多功能电子设备，还可把数字在显示器上显示，同时将结果数字化传输到主处理系统，并转化成标准的模拟信号。该仪表可测量的参数有：三相网络中的电压，电流，有功功率，无功功率，视在功率，功率因数以及频率。测量信号经电压或电流变换器传送到仪表。仪器的功能框图如图 4.3-43 所示。对于二进制信号，例如，测量的频率信号（通道“a”）直接从输入电路传递到数字处理系统。对于变量，如测量变换器的电压信号则传输至多通道 A/D 变换器的输入端（通道“b”）。包含预处理系统的测量通道能够将来自输入电路的信号在预处理系统中进行预处理（通道“c”）。

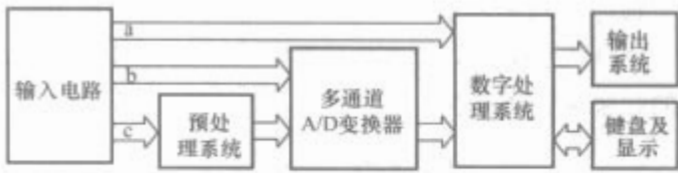


图 4.3-43 MPS-10 仪表测量线功能图

新一代测量设备，如 LUMEL 生产的 N9, N10 系列多功能可编程仪表，带有测量值显示功能，标准 RS-485 数字串行传输，处理成标准模拟信号功能，可用来测量三相三线或三相四线制电网。这些设备可完成电压和电流有效值，有功功率，无功功率，视在功率，功率因素，频率以及平均有功功率的测量。根据电压和电流的信号采样方法，对测量信号进行数字积分，实现测量。N9 表中的输入系统构成了测量块，该单元可根据被测量进行更换。N10 多功能仪表在单系统结构内完成测量功能。它是一种新产品，还未获得其操作特性的信息，且这些设备还未被批准进行船舶应用。

4.1.2.2 船用多参数测量设备

在造船行业，多参数设备即用于电量测量，也用于非电量测量。值得一提的是，适合于海上使用的多参数设备，不仅作为测量仪器，同时也是监视，报警和控制系统的组成部分。

多参数测量设备 SYNPOL[®]D 是一种“紧凑型”设备，经常被用于船舶电站中。有的船舶电站中每台发电机都配有 SYNPOL[®]D 设备，可连续提供主要参数的瞬时值，例如，电压（有效值以及不平衡度），电流，频率，功率以及功率因数，反映了电动机的工作特性（如图 4.3-44）。

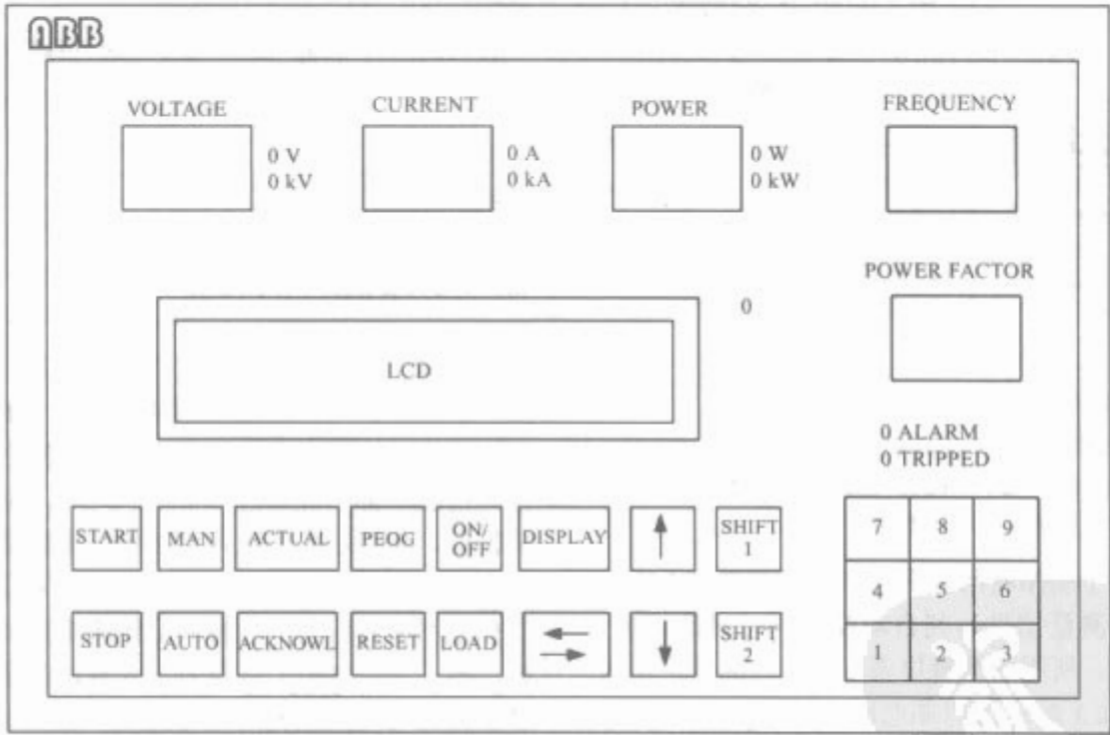


图 4.3-44 ABB SYNPOL[®]D 多参数测量仪的表盘视图（ABB Zamech Marine 公司授权生产）

在一块液晶显示屏上，数据以数字的形式显示，另外，用模拟量的光带形式显示了被测量瞬时值占其额定值的百分比。

该设备已经通过了多家船级社的批准并授予了证明，如：劳氏船级社（Lloyd Register），DNV，美国船舶检验局（ABS）。尽管该设备测量范围广泛，但却并不适合对电能质量进行评估，因其不能测得被测信号的瞬时波形以及过渡过程的相应参数。不过由于其测量的冗余度较大，故对它的选用符合船舶电站控制的可靠性要求日益提高的趋势。

另一个应用于船舶系统的多参数测量设备是 SAU8810

（Norcontrol 公司的信号采集装置），用于 Norcontrol 公司生产的监控、报警和控制系统。SAU 多参数测量设备的面板如图 4.3-45 所示。该设备有 32 通道，可以进行数字化显示并分析每一个被测值。

4.1.2.3 用现有测量仪器分析船舶电能质量的可行性评估

使用标准测量仪器难以评估船舶电网的电能质量。因其只在船舶试航，即实际使用之前，做全面的检测；然后只在周期性的船舶检修或装置更新时做部分的检测，临时性采用专门的仪器来完成相应的测量。

船舶所安装的测量设备，同样不能评估船舶电网中的电

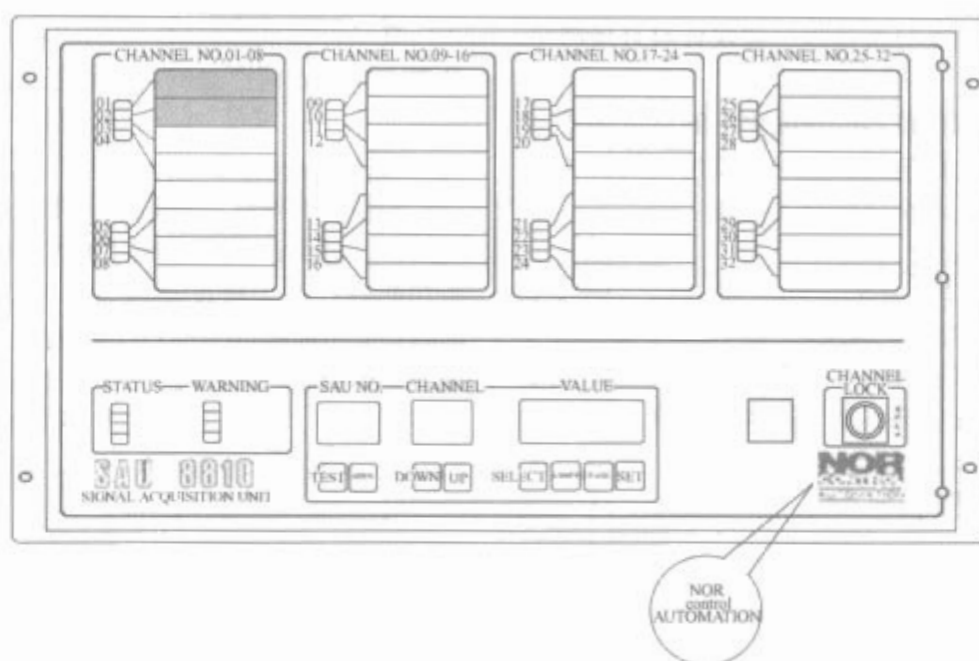


图 4.3-45 Norcontrol SAU8810 多参数仪表面盘

压电流波形畸变程度,也不能指示出畸变位置以及引起畸变的原因。导致的结果是,除了船舶电力系统工作效率下降外,频繁的故障所引起的电网信号畸变,使一些船舶系统的运行发生故障,尤其是自动控制电路发生严重故障。例如,通过现有的测量设备还无法指出:轴带发电机中与逆变器系统相配合的滤波器在滤除高次谐波时,为何有时会导致严重的电压畸变,等诸如此类的故障原因。结果,当配置了带逆变器电路的,由船舶主轴驱动的轴带发电机的船舶在大浪中航行时,一些供电设备的投入运行有时会发生严重的故障,尤其是那些安装有电力电子控制系统的设备。为了使那些设备正常运行,必须接通一套常规的发电机组与轴带发电机并联运行。尽管同步运行降低了电网信号畸变,但这是以电动机以及其他用电设备的不经济运行作为代价的。由于发电机组持续运行在低负载下,轴带发电机的功率余额大为增加,从而使功率损耗增加了。

随着测量系统设计技术的进步,目前提出改变船舶主配电板和应急配电板的基本测量设备的技术方案是合理的。

值得一提的是,畸变和扰动的程度通常会随着时间变大,且难以控制。因此,有必要采用一些特殊的设备做适当的补偿,例如,采用可独立监控每一相的谐波和高频畸变的电能质量分析仪。这一点对于大量应用基于微处理器和自动化电路的先进电子系统的新型船舶以及对现有船舶的现代化改造尤其重要。

4.2 船级社对船舶测量与控制设备的规定

各船级社规定的“船舶设备的环境测试”都是基于国际船级社协会(IACS)的相关文件。一般有两部分组成,第一部分包含规则适用性等的基本信息,第二部分是按下列3个分类所进行的产品测试的步骤:①电气设备;②自动化系统;③船舶应用的计算机系统。值得说明的是航海与无线电设备的测试应该与国际电工委员会(IEC)的规定一致。

在对比了六个船级社(劳氏船级社(Lloyd's Register)、挪威船级社(Det Norske Veritas)、德国劳氏船级社(Germanischer Lloyd)、Bureau Veritas、Registro Italiano Navale和波兰船级社(Polish Register of Shipping))的测试规定时,可知它们的要求是基本相同的。

4.2.1 与电力系统电能质量相关的环境测试要求

各船级社对于船舶电网的电能质量要求,首先是保证主配电板汇流排上的三相电压以符合要求的质量不间断地供

电。其次,要保证并联运行的发电机之间有功功率和无功功率的按比例分配。

供电中断与供电参数的变化——“供电故障”测试由5分钟内的三次中断构成,每次中断持续30秒。测试后设备要能正常运行。

电磁兼容——在测试条件为:频宽为80MHz~2GHz,信号调制为80%,调制信号频率为1000Hz,场强为10V/m时,被测设备应该在测试中、测试后都能够正常运行,而不发生任何故障。

另外,对于船舶设备在电磁兼容方面的测试还包括五个细分项,即:“ns级的脉冲干扰”下的测试,“高频干扰”下的测试,“高能脉冲干扰”下的测试,“低频干扰”下的测试,以及“辐射干扰”下的测试。

4.2.2 船级社对船舶电网测量与控制装置的规定

4.2.2.1 船舶配电板的测量装置

根据2006年出版的中国船级社“钢质海船入级规范”的第4篇“电气装置”的规定,有“测量仪表的精密等级,应根据仪表的作用选择,但应不低于1.5级”;“功率表的上量限应约为线路额定功率的120%,供并联运行的直流发电机用电流表和供并联运行交流发电机用功率表,应能分别指示出15%的逆电流或逆功率”;“应急电源或临时应急电源充放电板应至少设置下述测量仪表:①电压表,测量充电电压;②电流表,测量充电电流。”

另有一些船级社规定,主配电板以及应急配电板须安装下列测量装置:带开关的电流表每相一个;带开关的电压表每相一个;频率表(双系统双踪频率仪用于测量并联工作的发电机);功率表(对于输出超过50kVA的发电机);其他仪表。电力推进电站的额定电压、额定电流和额定功率应在仪表测量范围内,相应值要能清楚地显示于测量仪器上。

4.2.2.2 船舶条件下测量与控制装置的精度及相应规定

由于船舶所处外界环境的不确定性,以及船舶本身的机械环境和电气环境的多变性,要使船舶在运行时的测量条件如船级社的规定所述是不可能的。因此,在对测量结果进行评估时,有必要考虑由于周围环境的影响对测量结果所造成的附加误差。在船舶运行时,由于测量仪器的额定工作环境和实际工作环境的不同有时会导致较大的附加误差。即船用测量仪表在进行精度评估时,应考虑到可能的附加误差。也就是说,船舶条件下对测量精度的分析,应考虑两种情况下测量设备的精度,即额定情况下和实际运行情况下。而事实

上, 现行的对测量仪表的精度分析过程一般仅针对直接测量误差。

在额定工作环境下, 测量仪器的精度由它的基本误差来表征, 即绝对误差与量程的比值。而绝对误差是由仪表的结构设计和技术特性决定的, 与全量程有关, 即

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{\text{量程}} \times 100[\%] \tag{4.3-94}$$

式中: Δ_p 为绝对误差; δ_p 为基本误差。

测量仪器的精度等级与它的基本误差密切相关, 所采用的测量仪器的精度等级的值应该不小于基本误差值。即

$$d \geq \delta_p \tag{4.3-95}$$

式中: d 为测量仪器的精度等级。

在进行直接测量时, 若采用了一个给定精度等级的测量装置, 则仪表将产生的最大误差 Δ_g 也同时已知, 即

$$\Delta_g = d \times \text{量程} / 100 \tag{4.3-96}$$

Δ_g 一般比 Δ_p 要大, 这从它们的定义可知。

目前已有提议, 在船舶条件下, 在考虑仪表外部磁场的前提下, 对仪表测量时的附加误差可规定为: ①当仪表带屏蔽功能时: 对于精度等级为 0.05、0.1、0.2、0.5 的仪表, 附加误差不能超过 $\pm 1.5\%$; 而对于其余精度等级的仪表, 附加误差不能超过 $\pm 3\%$ 。②当仪表不带屏蔽功能时: 对于精度等级为 0.05、0.1、0.2、0.5 的仪表, 附加误差不能超过 $\pm 3\%$; 对于其余精度等级的仪表, 附加误差不能超过 $\pm 6\%$ 。



第4章 船舶电力系统分析与仿真

1 船舶电力系统元件数学模型

1.1 特种发电机模型 (十二相整流发电机模型、双绕组发电机模型)

1.1.1 十二相整流发电机模型

对于定子上具有四Y移 15° 对称绕组的十二相同步发电机,为了使分析具有一般性,假定转子上除了阻尼绕组和 d 方向的励磁绕组外,在 q 方向还有一附加短路绕组。

1.1.1.1 假设条件

(1) 忽略空间谐波磁场的影响,即认为气隙磁场是按正弦分布的。

(2) 忽略发电机铁心的饱和、磁滞及涡流的影响,导线的集肤效应也不考虑。

(3) 将同步发电机转子上的阻尼回路看成两组等效的阻尼绕组,即直轴阻尼绕组和交轴阻尼绕组。

1.1.1.2 正方向的选择

(1) 电压、电流的正方向选为:定子电路按发电机状态,转子电路与之相反。

(2) 磁链的正方向选为:正方向的定子电流产生负的磁链,正方向的转子电流产生正的磁链。

派克变换矩阵如下

$$C_{dqp}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} C_{11} & & & \\ & C_{22} & & \\ & & C_{33} & \\ & & & C_{44} \\ & & & & I \end{bmatrix} \quad (4.4-3)$$

其中

$$C_{ii} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos[\theta - (i-1)15^\circ] & \cos[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & \cos[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] \\ -\sin[\theta - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4.4-4)$$

$i=\overline{1,4}$, I 为 4×4 的单位矩阵。

$$C_{abc}^{dqp} = [C_{dqp}^{abc}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11}^{-1} & & & \\ & C_{22}^{-1} & & \\ & & C_{33}^{-1} & \\ & & & C_{44}^{-1} \\ & & & & I \end{bmatrix} \quad (4.4-5)$$

其中

$$C_{ii}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos[\theta - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - (i-1)15^\circ] & 1 \\ \cos[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & 1 \\ \cos[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] & 1 \end{bmatrix} \quad i=\overline{1,4} \quad (4.4-6)$$

其中

$$\psi_{dqp} = [\psi_{d1} \psi_{q1} \psi_{b1} \psi_{d2} \psi_{q2} \psi_{b2} \psi_{d3} \psi_{q3} \psi_{b3} \psi_{d4} \psi_{q4} \psi_{b4} \psi_{fd} \psi_{kd} \psi_{fq} \psi_{kq}]^T = C_{dqp}^{abc}(\theta) \psi_{abc} \quad (4.4-7)$$

$$i_{dqp} = [i_{d1} i_{q1} i_{b1} i_{d2} i_{q2} i_{b2} i_{d3} i_{q3} i_{b3} i_{d4} i_{q4} i_{b4} i_{fd} i_{kd} i_{fq} i_{kq}]^T = C_{dqp}^{abc}(\theta) i_{abc} \quad (4.4-8)$$

$$u_{dqp} = [u_{d1} u_{q1} u_{b1} u_{d2} u_{q2} u_{b2} u_{d3} u_{q3} u_{b3} u_{d4} u_{q4} u_{b4} u_{fd} 0 0 0]^T = C_{dqp}^{abc}(\theta) u_{abc} \quad (4.4-9)$$

(3) 转子旋转方向和 d - q 轴正方向选为:转子旋转正方向为逆时针方向, q 轴正方向领先 d 轴正方向 90° 电角度见图4.4-1。

1.1.1.3 dqp 系统的基本方程

十二相整流发电机在 dqp 轴系统的基本方程如下

$$u_{dqp} = p\psi_{dqp} + A\psi_{dqp} p\theta - R_{dqp} i_{dqp} \quad (4.4-1)$$

$$\psi_{dqp} = X_{dqp} i_{dqp} \quad (4.4-2)$$

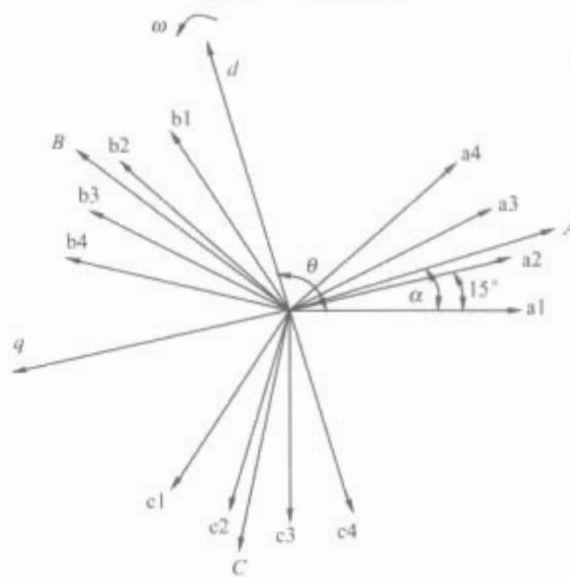


图4.4-1 定子相轴和转子轴线的相对位置

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & & & \\ & A_{22} & & \\ & & A_{33} & \\ & & & A_{44} \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5-10)$$

0 为 4×4 的零矩阵。

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad i = \overline{1,4} \quad (4.4-11)$$

$$R_{dpo} = \text{diag}(r, r, r, r, r, r, r, r, r, r, r, r, -r_{fd}, -r_{kd}, -r_{fq}, -r_{kq}) \quad (4.4-12)$$

$$X_{dpo} = C_{dpo}^{abc}(\theta) X_{abc} C_{abc}^{dpo}(\theta) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{1r} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{2r} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{3r} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{4r} \\ -3D_{1r}^T/2 & -3D_{2r}^T/2 & -3D_{3r}^T/2 & -3D_{4r}^T/2 & X_{rr} \end{bmatrix} \quad (4.4-13)$$

$$D_{ii} = \text{diag}(-x_{dy}, -x_{qy}, -x_{oy}) \quad i = \overline{1,4} \quad (4.4-14)$$

$$D_{12} = D_{23} = D_{34} = \begin{bmatrix} -x_{dm1} & x_{dqm1} & 0 \\ -x_{dqm1} & -x_{qm1} & 0 \\ 0 & 0 & -x_{om1} \end{bmatrix} \quad (4.4-15)$$

$$D_{13} = D_{24} = \begin{bmatrix} -x_{dm2} & x_{dqm2} & 0 \\ -x_{dqm2} & -x_{qm2} & 0 \\ 0 & 0 & -x_{om2} \end{bmatrix} \quad (4.4-16)$$

$$D_{14} = \begin{bmatrix} -x_{dm3} & x_{dqm3} & 0 \\ -x_{dqm3} & -x_{qm3} & 0 \\ 0 & 0 & -x_{om3} \end{bmatrix} \quad (4.4-17)$$

$$D_{ij} = D_{ji}^T, i, j = \overline{1,4} \quad (4.4-18)$$

$$D_r = \begin{bmatrix} x_{afdy} & x_{akdy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{afqy} & x_{akqy} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad i = \overline{1,4} \quad (4.4-19)$$

其中

$$\begin{aligned} x_{dy} &= x_{sy} + x_{ady}, x_{qy} = x_{sy} + x_{aqy}, x_{oy} = x_{ss} + 2x_{s8} \\ x_{dm1} &= x_{sm1} + x_{ady}, x_{dm2} = x_{sm2} + x_{ady}, x_{dm3} = x_{sm3} + x_{ady} \\ x_{qm1} &= x_{sm1} + x_{aqy}, x_{qm2} = x_{sm2} + x_{aqy}, x_{qm3} = x_{sm3} + x_{aqy} \\ x_{om1} &= x_{s1} + x_{s7} + x_{s9}, x_{om2} = x_{s2} + x_{s6} + x_{s10} = x_{s6} \\ &= x_{om3} = x_{s11} + x_{s3} + x_{s5} = -x_{om1} \\ x_{dm1} &= x_{dm3} = x_{sm1} + x_{ady}, x_{qm1} = x_{qm3} = x_{sm1} + x_{aqy} \\ x_{afdy} &= 3x_{afd}/2, x_{akdy} = 3x_{akd}/2, x_{afqy} = 3x_{afq}/2, x_{akqy} = 3x_{akq}/2 \end{aligned}$$

因此描述十二相电机的参数集为: $x_{dy}, x_{qy}, x_{oy}, x_{dm1}$ ($=x_{dm3}$), x_{dm2}, x_{qm1} ($=x_{qm3}$), x_{qm2}, x_{dqm1} ($=x_{dqm3}$), x_{dqm2} ($=x_{om2}$), x_{om1} ($=-x_{om3}$), $x_{afdy}, x_{akdy}, x_{afqy}, x_{akqy}, x_{fd}, x_{fdk}, x_{kd}, x_{fq}, x_{fqk}, x_{kq}, r, r_{fd}, r_{fq}, r_{kd}, r_{kq}$ 。

假设定子两绕组间的互漏抗与两绕组轴线间夹角的余弦成正比, 即 $x_{sk} = x_{s0} \cos(k15^\circ)$, $k = \overline{1,4}$, 其中 x_{s0} = 常数, 则有

$$x_{s6} = 0$$

$$x_{dqm1} = x_{dqm2} = x_{dqm3} = x_{om1} = x_{om2} = x_{om3} = 0$$

$$x_{sm1} = x_{sm2} = x_{sm3} = x_{sm} = \sqrt{3}x_{s2} = 3x_{s0}/2$$

$$x_{dm1} = x_{dm2} = x_{dm3} = x_{dm} = x_{sm} + x_{ady}$$

$$x_{qm1} = x_{qm2} = x_{qm3} = x_{qm} = x_{sm} + x_{aqy}$$

作此假设仅仅是为了使方程简化 (主要是使 d, q 解耦)。若不作此假设, 也可以求解。对 midpoint 不引出的十二相 (15°相带) 同步电机的暂态过程的数值计算表明, 此假设引起的误差小于 5% (在工程允许范围内)。同时, 为使方程式 (4.5-13) 中互电抗可逆, 取

$$i_{dpo} = [i_{d1} i_{q1} i_{o1} i_{d2} i_{q2} i_{o2} i_{d3} i_{q3} i_{o3} i_{d4} i_{q4} i_{o4} i_{fdy} i_{kdy} i_{fqy} i_{kqy}]^T \quad (4.4-20)$$

$$i_{fdy} = 3i_{fd}/2, i_{kdy} = 3i_{kd}/2, i_{fqy} = 3i_{fq}/2, i_{kqy} = 3i_{kq}/2 \quad (4.4-21)$$

$$r_{fdy} = 3r_{fd}/2, r_{kdy} = 3r_{kd}/2, r_{fqy} = 3r_{fq}/2, r_{kqy} = 3r_{kq}/2 \quad (4.4-22)$$

电磁转矩 M 用标么值表示, 可得

$$\begin{aligned} M &= \frac{\text{跨气隙到达定子的功率}}{\text{转子机械角速度}} \\ &= \sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) p\theta / (4p\theta) \\ &= \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) \\ &= \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (i_{\beta k} \psi_{\alpha k} - i_{\alpha k} \psi_{\beta k}) \\ &= \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (u_{\alpha k} i_{\alpha k} + u_{\beta k} i_{\beta k}) + \sum_{k=1}^4 (i_{\alpha k}^2 + i_{\beta k}^2) r - \sum_{k=1}^4 (i_{dk} p \psi_{dk} + i_{qk} p \psi_{qk}) \end{aligned} \quad (4.4-23)$$

转子运动方程

$$M_i - M = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (4.4-24)$$

式中: J 为转动轴系的等效转动惯量; M_i 为输入机械转矩; M 为电磁转矩。

1.1.2 双绕组发电机数学模型

1.1.2.1 发电机结构

双绕组发电机在同一台发电机上使用两套绕组, 一套绕组提供交流电, 另一套绕组经过整流提供直流电, 在空间和成本上都可获得比较好的效益, 如图 4.4-2 所示。4 个均匀分布的三相绕组 (整流绕组) 提供低脉动的直流电。转子上除了布置有与普通三相交流发电机一样的励磁绕组 (fd)、直轴阻尼绕组 (kd)、交轴阻尼绕组 (kq) 外, 还有一套 q 轴绕组 (fq), 用于改善系统的稳定性。

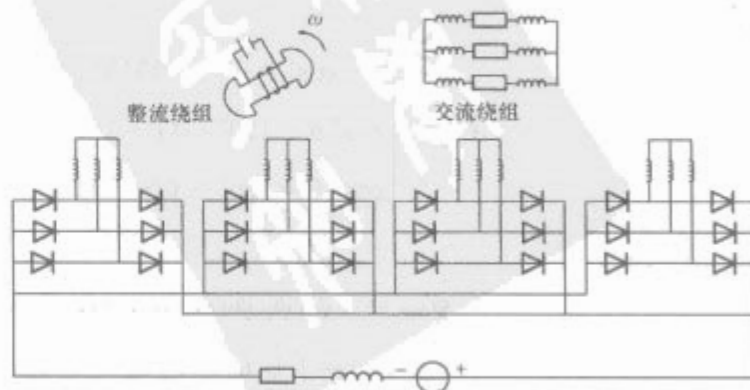


图 4.4-2 双绕组发电机结构示意图

1.1.2.2 基本假设

(1) 忽略空间谐波磁场的影响,即认为气隙磁场是按照正弦分布的。

(2) 忽略发电机铁心的饱和、磁滞及涡流的影响,导线的集肤效应也不考虑。

(3) 将同步发电机转子上的阻尼回路看成两组等效的阻尼绕组,即直轴阻尼绕组和交轴阻尼绕组,且转子结构对直、交轴对称。

(4) 除特别注明者外,各量均用标么值(pu)表示,定子电压、电流取三相交流绕组额定相电压、相电流的幅值作为基值,功率基值 $P_b = 3u_b i_b / 2$,转矩基值 $M_b = pP_b / \omega_b = 3p\psi_b i_b / 2$ 。

1.1.2.3 正方向选择

(1) 电压、电流正方向选为:定子电路按发电机惯例,转子电路按电动机惯例。

其中

$$C_{ii} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos[\theta - (i-1)15^\circ] & \cos[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & \cos[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] \\ -\sin[\theta - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] \end{bmatrix}, i = \overline{1,4}$$

$$C_{AA} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - 120^\circ) & \cos(\theta - \alpha + 120^\circ) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - 120^\circ) & -\sin(\theta - \alpha + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

I 为 4×4 的单位矩阵。

$$C_{abc}^{dq} = [C_{dq}^{abc}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11}^{-1} & & & \\ & C_{22}^{-1} & & \\ & & C_{33}^{-1} & \\ & & & C_{44}^{-1} \\ & & & & C_{AA}^{-1} \\ & & & & & I \end{bmatrix} \quad (4.4-26)$$

其中

$$C_{ii}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos[\theta - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - (i-1)15^\circ] \\ \cos[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta - 120^\circ - (i-1)15^\circ] \\ \cos[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] & -\sin[\theta + 120^\circ - (i-1)15^\circ] \end{bmatrix}, i = \overline{1,4}$$

$$C_{AA}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha) \\ \cos(\theta - \alpha - 120^\circ) & -\sin(\theta - \alpha - 120^\circ) \\ \cos(\theta - \alpha + 120^\circ) & -\sin(\theta - \alpha + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

(2) 磁链和电压的参数方程。由上节可知

$$u_{dq} = p\psi_{dq} + A\psi_{dq}p\theta - R_{dq}i_{dq} \quad (4.4-27)$$

$$\psi_{dq} = X_{dq}i_{dq} \quad (4.4-28)$$

其中

$$\psi_{dq} = [\psi_{d1} \psi_{q1} \psi_{d2} \psi_{q2} \psi_{d3} \psi_{q3} \psi_{d4} \psi_{q4} \psi_{dA} \psi_{qA} \psi_{fd} \psi_{kd} \psi_{fq} \psi_{kq}]^T = C_{dq}^{abc}(\theta)\psi_{abc}$$

$$i_{dq} = [i_{d1} i_{q1} i_{d2} i_{q2} i_{d3} i_{q3} i_{d4} i_{q4} i_{dA} i_{qA} i_{fd} i_{kd} i_{fq} i_{kq}]^T = C_{dq}^{abc}(\theta)i_{abc}$$

$$u_{dq} = [u_{d1} u_{q1} u_{d2} u_{q2} u_{d3} u_{q3} u_{d4} u_{q4} u_{dA} u_{qA} u_{fd} 0 0 0]^T = C_{dq}^{abc}(\theta)u_{abc}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & & & \\ & A_{22} & & \\ & & A_{33} & \\ & & & A_{44} \\ & & & & A_{AA} \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

0 为 4×4 的零矩阵。

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, i = \overline{1,4}$$

$$R_{dq} = \text{diag}(r_y, r_y, r_y, r_y, r_y, r_y, r_y, r_y, r_A, r_A, -r_{fd}, -r_{kd}, -r_{fq}, -r_{kq});$$

$$X_{dq} = C_{dq}^{abc}(\theta)X_{abc}C_{dq}^{abc}(\theta)$$

$$= \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{1r} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{2r} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{3r} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{4r} \\ -3D_{1r}^T/2 & -3D_{2r}^T/2 & -3D_{3r}^T/2 & -3D_{4r}^T/2 & X_{rr} \end{bmatrix};$$

(2) 磁链的正方向选为:正方向的定子电流产生负的磁链,正方向的转子电流产生正的磁链。

(3) 转子旋转方向和 d - q 轴正方向选为:转子旋转正方向为逆时针方向, q 轴正方向领先 d 轴正方向 90° 电角度。

1.1.2.4 d - q 系统的基本方程

(1) 变换矩阵。应用推广的三相电动机的 Park 变换,对双绕组电机方程进行坐标变换,取变换矩阵为

$$C_{dq}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} C_{11} & & & \\ & C_{22} & & \\ & & C_{33} & \\ & & & C_{44} \\ & & & & C_{AA} \\ & & & & & I \end{bmatrix} \quad (4.4-25)$$

$$C_{dq}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} C_{11} & & & \\ & C_{22} & & \\ & & C_{33} & \\ & & & C_{44} \\ & & & & C_{AA} \\ & & & & & I \end{bmatrix}$$

$$D_{ii} = \text{diag}(-x_{dy}, -x_{qy}), i = \overline{1,4}$$

$$D_{AA} = \text{diag}(-x_{dA}, -x_{qA});$$

$$D_{12} = D_{23} = D_{34} = \begin{bmatrix} -x_{dm1} & x_{dqm1} \\ -x_{dqm1} & -x_{qm1} \end{bmatrix};$$

$$D_{13} = D_{24} = \begin{bmatrix} -x_{dm2} & x_{dqm2} \\ -x_{dqm2} & -x_{qm2} \end{bmatrix};$$

$$D_{14} = \begin{bmatrix} -x_{dm3} & x_{dqm3} \\ -x_{dqm3} & -x_{qm3} \end{bmatrix} = D_{12};$$

$$D_{iA} = \begin{bmatrix} -x_{dmAyi} & x_{dqmAyi} \\ -x_{dqmAyi} & -x_{qmAyi} \end{bmatrix}, i = \overline{1,4};$$

$$D_{ji} = D_{ij}^T, i, j = \overline{1,4}; D_{iA} = D_{Ai}^T;$$

$$D_{ir} = \begin{bmatrix} x_{afdy} & x_{akdy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{afqy} & x_{akqy} \end{bmatrix}, i = \overline{1,4};$$

$$D_{Ar} = \begin{bmatrix} -x_{afdy} & x_{akdy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{afqy} & x_{akqy} \end{bmatrix}$$

式中:下标 y 表示定子十二相整流绕组单 Y 绕组的参数,下标 A 表示三相交流绕组的参数,下标 m1, m2 和 m3 分别表示相差 15°、30°和 45°十二相绕组的两 Y 的互感参数,下标 m、A、l、i 表示十二相绕组的 Y_i 与三相交流绕组之间的互感参数;

描述 3/12 发电机的最小参数集为

{ x_{dy} , x_{qy} , x_{dA} , x_{qA} , x_{dm1} ($=x_{dm3}$), x_{dm2} , x_{qm1} ($=x_{qm3}$), x_{qm2} , x_{dqm1} ($=-x_{dqm3}$), d_{qm2} , x_{dmAy1} , x_{qmAy1} , x_{dqmAy1} , x_{afdy} , x_{akdy} , x_{afqy} , x_{akqy} , x_{afqy} , x_{afqy} , x_{fd} , x_{fdkd} , x_{fqkq} , x_{kd} , x_{fq} , x_{kq} , r_y , r_A , r_{fd} , r_{fq} , r_{kd} , r_{kq} }

(3) 双绕组发电机参数的表示。由最小参数集合可知,不同 Y 的 d、q 之间不解耦,即存在互感抗,但从这些互感抗的表示式可以看出,其数值很小,属于漏抗性质。若将各 Y 绕组 d、q 之间的互感抗忽略,则可得到解耦的发电电机参数模型。

借鉴三相发电机和十二相发电机的参数定义,忽略不同 Y 绕组 d、q 耦合的影响,3/12 相双绕组交直流发电机的最小参数集合可表示为以下五部分:

1) 定子三相交流绕组的参数 x_{dA} 、 x_{qA} 、 r_A 分别表示三相交流绕组的 d 轴、q 轴同步电抗和绕组相电阻。

2) 定子十二相绕组参数 x_{dy} 、 x_{qy} 、 x_{dm1} 、 x_{dm2} 、 x_{qm1} 、 x_{qm2} 、 r_y 分别表示十二相单 Y 绕组的 d 轴、q 轴同步电抗, d 轴、q 轴同步互感电抗和绕组的相电阻。

3) 定子十二相和三相绕组的互感参数 x_{dmAy1} 、 x_{dmAy2} 、 x_{dmAy3} 、 x_{dmAy4} 、 x_{qmAy1} 、 x_{qmAy2} 、 x_{qmAy3} 、 x_{qmAy4} 分别表示三相相对十二相各个 Y 的 d 轴和 q 轴的互感同步电抗。

4) 转子参数: x_{fd} 、 x_{fdkd} 、 x_{fqkq} 、 x_{kd} 、 x_{fq} 、 x_{kq} 、 r_{fd} 、 r_{fk} 、 r_{fq} 、 r_{kd} 、 r_{kq} 。

5) 定子绕组与转子绕组的互感参数 x_{afdy} 、 x_{akdy} 、 x_{afqy} 、 x_{akqy} 分别表示定子三相交流绕组和转子励磁、直轴阻尼、交轴和交轴阻尼绕组之间的互感电抗,利用上述互感参数除以比例系数 k 可得到相应的定子十二相绕组与转子绕组的互感参数,其中 k 为三相绕组和十二相绕组的有效匝数之比。

当转子采用 x_{ad} 标么值系统时

$$x_{fdkd} = x_{afdy} = x_{akdy} = x_{ad}$$

$$x_{fqkq} = x_{afqy} = x_{akqy} = x_{aq}$$

因此 4) 和 5) 中的参数可表示为

$$x_{fd}$$
, x_{kd} , x_{fq} , x_{kq} , r_{fd} , r_{fq} , r_{kd} , r_{kq} , x_{ad} , x_{aq}

利用以上几部分参数即可描述发电机完整的数学模型,由此可对发电机进行解析分析和仿真研究。

1.1.2.5 输出功率、电磁转矩和转子运动方程

(1) 输出功率。输出功率 P 用标么值表示,取基值

$$P_b = 3u_b i_b / 2 = 3u_{Nm} i_{Nm} / 2 = 3u_N i_N \quad (4.4-29)$$

式中: u_N 、 i_N 分别为三相交流绕组的额定电压和电流。

于是可得

$$\begin{aligned} P &= 2/3 \left[\sum_{k=1}^4 (u_{ak} i_{ak} + u_{bk} i_{bk} + u_{ck} i_{ck}) + u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \right] \\ &= \sum_{k=1}^4 (u_{ak} i_{ak} + u_{bk} i_{bk}) + u_{aA} i_{aA} + u_{\beta A} i_{\beta A} \\ &= \sum_{k=1}^4 (u_{dk} i_{dk} + u_{qk} i_{qk}) + u_{dA} i_{dA} + u_{qA} i_{qA} \\ &= \sum_{k=1}^4 (i_{dk} p \psi_{dk} + i_{qk} p \psi_{qk}) + i_{dA} p \psi_{dA} + i_{qA} p \psi_{qA} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) p \theta + (i_{qA} \psi_{dA} - i_{dA} \psi_{qA}) p \theta - \\ &\sum_{k=1}^4 (i_{ak}^2 + i_{bk}^2) r + (i_{aA}^2 + i_{\beta A}^2) r_A \end{aligned} \quad (4.4-30)$$

(2) 电磁转矩。电磁转矩 M 用标么值表示,取基值

$$M_b = P_b / \Omega_b = p P_b / \omega_b = 3 p \psi_b / i_b \quad (4.4-31)$$

式中: Ω_b 、 ω_b 和 p 分别为发电机转子机械角速度、电角速度的基值和极对数。

于是可得

$$\begin{aligned} M &= \frac{\text{跨气隙到达定子的功率}}{\text{转子机械角速度}} \\ &= \left[\sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) p \theta + (i_{qA} \psi_{dA} - i_{dA} \psi_{qA}) p \theta \right] / (p \theta) \\ &= \sum_{k=1}^4 (i_{qk} \psi_{dk} - i_{dk} \psi_{qk}) + (i_{qA} \psi_{dA} - i_{dA} \psi_{qA}) \\ &= \sum_{k=1}^4 (i_{\beta k} \psi_{ak} - i_{ak} \psi_{\beta k}) + i_{\beta A} \psi_{aA} - i_{aA} \psi_{\beta A} \\ &= \sum_{k=1}^4 (u_{ak} i_{ak} + u_{\beta k} i_{\beta k}) + u_{aA} i_{aA} + u_{\beta A} i_{\beta A} + \\ &\quad \sum_{k=1}^4 (i_{ak}^2 + i_{\beta k}^2) r + (i_{aA}^2 + i_{\beta A}^2) r_A - \\ &\quad \sum_{k=1}^4 (i_{dk} p \psi_{dk} + i_{qk} p \psi_{qk}) + (i_{dA} p \psi_{dA} + i_{qA} p \psi_{qA}) \end{aligned} \quad (4.4-32)$$

(3) 转子运动方程。即

$$M_i - M = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (4.4-33)$$

式中: J 为转动轴系的等效转动惯量; M_i 为输入机械转矩; M 为电磁转矩。

1.2 励磁系统数学模型

在“单位励磁电压/单位定子电压”基准值系统下, E_{fq} 等于发电机的励磁绕组电压 u_f 。发电机励磁绕组电压受发电机励磁系统的控制,因此必须建立发电机励磁系统的数学模型。

发电机励磁系统的基本功能是给发电机的励磁绕组提供合适的直流电流,以在发电机定子空间产生磁场。

励磁系统主要由主励磁系统和励磁调节器组成。主励磁系统为发电机提供励磁电流,励磁调节器用于对励磁电流进行调节或控制。

在船舶电站和其他移动电站中应用的扰动补偿型励磁装置中,主要是相复励装置和三谐波励磁装置。其中以相复励应用最广。相复励装置指既能反映电流大小,又能反映电流相位的励磁控制系统。它既可以直接以不可控相复励装置的形式给同步发电机励磁,又可以和电压校正器配合,也可以在交流无刷励磁系统中给同步发电机的交流励磁机励磁。这三种装置(不可控相复励,可控相复励以及以相复励为励磁装置的无刷励磁)在船舶电站的励磁装置中占有很大的比重。

对相复励装置的一种数学描述方法是认为稳态工况下的输出励磁电压为

$$U_i = \sqrt{U^2 + (KI)^2} + 2KI U \sin \varphi \quad (4.4-34)$$

式中: U、I 分别为发电机的端电压和负载电流; K 为包括电流互感器变比和复励阻抗在内的系数。

1.2.1 三相桥式整流器的相复励装置的传递函数

三相相复励装置的传递函数与单相电路形式相同,但系数 K 和 a 的值不同。当以励磁电压为输出时,传递函数为

$$\frac{U_f(s)}{A(s)} = \frac{K_3}{a_3} \frac{1 + a_3 T_{eq3}s}{1 + T_{eq3}s} \quad (4.4-35)$$

当以励磁电流为输出时,传递函数为

$$\frac{I_f(s)}{A(s)} = \frac{K_3}{a_3} \frac{1}{(1 + T_{eq3}s)R_f} \quad (4.4-36)$$

$$K_3 = 9\sqrt{2}/\pi, a_3 = 1 + 9x/(\pi R_f), T_{eq3} = T_d'/a_3$$

1.2.2 晶闸管励磁系统

在船舶电站应用的负反馈励磁系统,主要是晶闸管励磁系统。虽然这种励磁系统的电路种类很多,但基本功能环节大致相同,主要包括测量、比较、移相触发、晶闸管整流以及校正等。

下面列出各环节的传递函数,并把反馈通道的所有其他比例系数都计入 K'_b ,把前向通道的所有其他比例系数都计入 K'_R 。

反馈测量环节

$$W'_b(s) = \frac{K'_b}{1 + T_b s} \quad (4.4-37)$$

比较环节

$$W_c(s) = -1 \quad (4.4-38)$$

移相触发环节

$$W'_R(s) = \frac{K'_R}{1 + T_b s} \quad (4.4-39)$$

串联校正环节

$$W_k(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{\left(\frac{T_1}{\beta} s + 1\right)(\beta T_2 s + 1)} \quad (4.4-40)$$

微分反馈环节

$$W'_K(s) = \frac{K_g}{1 + T_g s} \quad (4.4-41)$$

1.2.3 励磁机数学模型

在单机容量较大的船舶电站中,一般倾向于采用他励方式,这样能使整个励磁系统的体积、质量减小。老式的他励系统采用直流励磁机,新式的他励系统采用交流励磁机,即交流无刷励磁。

在同步发电机中,直流励磁绕组回路中的过渡过程比交流电枢回路中的过渡过程要慢得多。在忽略饱和的情况下,可认为发电机端电压与其励磁电流成正比,故交流励磁机的电枢电压可近似看成与励磁电流同时变化。励磁绕组的电流变化在很大程度上与电枢电路的外阻抗有关。在交流无刷励磁系统中,交流励磁机的电枢电路经旋转二极管整流后对主发电机的励磁绕组供给直流励磁电流。由于发电机励磁绕组电感值远远大于交流励磁机的励磁绕组电感值,因而可以认为交流励磁机的励磁电流近似按直轴暂态开路时间常数 τ_{d0} 变化。

$$\tau_{d0}' = L_f / R_f \quad (4.4-42)$$

式中: L_f 和 R_f 为交流励磁机励磁绕组的电感值和电阻值。

交流励磁机的传递函数为

$$\frac{E_f(s)}{E_p(s)} = \frac{K}{1 + \tau_{d0}' s} \quad (4.4-43)$$

式中: $E_p(s)$ 为励磁调节器输出给交流励磁机励磁绕组的电压的拉氏变换式。

一般交流励磁机的频率为几百赫兹,其时间常数比 50Hz 的主发电机的时间常数要小得多,故上式可得到足够精确的分析结果。

1.3 负荷数学模型

船舶电站的负荷,主要是异步电动机拖动装置,如舵机、锚机、水泵、压缩机、风机等,其特性各不相同,此外还有一部分电热、照明等设备。

在分析异步电动机负荷时,最常遇到的过渡过程是起动、制动、反转、加速、减速等。这些过程的共同特点是电流和转矩与稳定运行时的值相差很远,其峰值可能达到很大的数值,在最严重情况下,转矩可能达到额定转矩的 15 倍,电流可能达到堵转时的 3 倍。

1.3.1 异步电动机的数学模型

与同步发电机相似,采用派克变换可以得到异步电动机的电压方程式。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\dot{\psi}_{sq} \omega_k \\ \dot{\psi}_{sd} \omega_k \\ -(\omega_k - \omega) \psi_{rq} \\ (\omega_k - \omega) \psi_{rd} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} \quad (4.4-44)$$

式中:“s”表示定子侧的参数,“r”表示转子侧的参数。 ω_k 代表 d、q 轴的角速度, ω 代表异步电机的转子角速度。式中的参数用标么值表示。

磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s & 0 & x_{sd} & 0 \\ 0 & x_s & 0 & x_{sd} \\ x_{sd} & 0 & x_r & 0 \\ 0 & x_{sd} & 0 & x_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (4.4-45)$$

转子运动方程为

$$\frac{d\omega}{dt} = [x_{sd}(i_{rd} i_{sq} - i_{rq} i_{sd}) - M_c] / H \quad (4.4-46)$$

式中: M_c 为电动机轴上的机械阻力矩。

1.3.2 静态负荷的数学模型

在 abc 坐标系中,电阻—电感混合负载的微分方程组为

$$\omega L_e \approx x_e \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.4-47)$$

式中: u 、 i 为相电压和相电流; r 、 L 为负荷的电阻和电感。

将上式左乘派克变换矩阵 P ,并取某一同步发电机的 d—q 轴为参考系,则有

$$P U_{abc} = L_e P \dot{I}_{abc} + r_e P I_{abc} \quad (4.4-48)$$

$L_e = L_a = L_b = L_c$, $r_e = r_a = r_b = r_c$,表示三相负荷平衡系统。

由于

$$P \dot{I}_{abc} = \dot{I}_{0dq} + \omega \begin{bmatrix} 0 \\ -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (4.4-49)$$

可得(舍去零序分量)

$$U_{dq} = L_e \left(\dot{I}_{dq} + \omega \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \right) + r_e I_{dq} \quad (4.4-50)$$

通常作如下假设:系统的角速度与其额定角速度的差别不大,即 $\omega = \omega_n$, $L_e i$ 与 $\omega L_e i$ 相比可以忽略不计。这样 $\omega L_e \approx x_e$,从而得到

$$U_{dq} = r_e I_{dq} + x_e \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (4.4-51)$$

该式是代数方程,给出了解发电机状态方程所需要的辅助方

程而不增加系统的阶数。

电压和电流的关系式为

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{r_e}{Z_e^2} u_d + \frac{x_e}{Z_e^2} u_q \\ i_q &= -\frac{x_e}{Z_e^2} u_d + \frac{r_e}{Z_e^2} u_q \\ Z_e &= \sqrt{r_e^2 + x_e^2} \end{aligned} \quad (4.4-52)$$

式中： Z_e 为一相阻抗值。

1.4 参数辨识

1.4.1 参数辨识的定义

何谓系统参数辨识，简而言之，即为“动态建模”，利用被控制系统的输入、输出数据，经计算处理后，估计出系统的数学模型。现代科学的发展，对数学模型的需求愈加迫切。在工程领域上，各类系统的动态计算、分析都要有精确的数学模型。尤其对于船舶电力系统，静态、动态性能分析离不开系统的数学模型，包括发电机、原动机、各类控制系统及负荷模型等。

按照对待测系统的了解程度，可较形象地把系统分为三类。

(1) 黑箱 (Black Box)：对系统一无所知，其模型结构、阶数、参数等均未知。

(2) 灰箱 (Grey Box)：对系统部分了解，如已知模型结构、阶数、待测模型参数。

(3) 白箱 (White Box)：系统模型可用物理机理写出。

船舶电力系统的辨识建模多数属于灰箱建模，如发电机、原动机及其控制系统中的励磁系统等。

1.4.2 辨识方法的分类

根据辨识理论，参数辨识方法可分为经典辨识法和现代辨识法两类。经典辨识法是与经典控制理论相对应的，其建立的数学模型如时域脉冲响应、频域相频、幅频特性等均属此类范畴；现代辨识法适应现代控制理论的需要，其建立的数学模型有状态空间方程、差分方程等。表 4.4-1 概括了两类辨识方法的特点和数学模型。

表 4.4-1 辨识方法分类表

方 法		特 点	数学模型
经典法	卷积辨识法	确定性、时域非参数型	时域脉冲响应
	相关辨识法	随机性、时域非参数型	时域脉冲响应
	频域 FFT 法	随机性、频域非参数型	频域、幅频特性、相频特性
现代法	最小二乘法估计法	随机性、时域参数型	状态空间方程
	极大似然法		差分方程等
	卡尔曼滤波法		

从表中可见，经典辨识法所获取的数学模型不论是时域脉冲响应，还是频域频率特性，均属非参数型。但这些特性可以进一步用动态拟合的方法，求得其传递函数，即所谓间接辨识法。而现代辨识法求得的数学模型为状态空间方程或差分方程，属于参数型。因为是一步求得参数，故又称为直接辨识法。

此外，从辨识数据的处理过程看，辨识又可分为离线辨识和在线辨识。前者多用于非参数辨识间接求取数学模型；后者用微机在线处理数据，直接求得参数型模型，并可进一步用于适应性控制。

1.4.3 船舶电力系统参数辨识

具体而言，船舶电力系统的参数辨识包括同步发电机参数辨识、励磁系统参数辨识、负荷模型及参数辨识等方面内容。

1.4.3.1 同步发电机参数辨识

同步发电机参数辨识多采用抛载测试法、频域辨识法、详细模型的时域辨识法等。抛载法是在特定的转子位置下，突然切除负载，利用定子端电压的衰减曲线或励磁绕组电流的变化曲线来求取发电机全套导出参数，所测参数已考虑饱和效应等影响；频域辨识法是较早用于发电机参数辨识的一种方法，由于频域 FFT 和数据处理技术的发展而得到改进和应用，分为离线测试和在线测试；时域辨识采用最小二乘辨识法。

1.4.3.2 励磁系统参数辨识

励磁系统参数辨识方法包括频域辨识法（如快速傅立叶变换/最小二乘法 FFT/LSE）和时域辨识法（如线性多项式函数法 PLPF）。FFT/LSE 法通过 FFT 将系统输入、输出的时域信号转换为频域信号，经噪声滤波后，消除干扰因素，获得系统的幅频特性和相频特性，再通过 LSE 拟合估计参数值。PLPF 法是一种基于方程误差模型的算法，它通过对离散采样数据的多重积分估计模型参数值，直接求取待辨识系统传递函数相对应的微分方程的系数。

1.4.3.3 负荷模型及参数辨识

负荷模型及参数辨识多用统计综合法和总体辨识法。统计综合法把综合负荷看成众多用户的集合，首先在实验室确定各种典型负荷的平均特性，然后统计出各类负荷所占比例，估算出各类负荷的平均特性，最后进行综合，得出综合负荷的模型；总体辨识法把负荷看成一整体，作为一个随机系统来考虑。先利用数据采集装置，从现场采集负荷所在母线的 U 、 f 、 P 、 Q 等电量，然后根据系统辨识理论确定综合负荷模型。

1.5 船舶电力系统负荷预估

现代船舶都向大型化、电气化、智能化方向发展，船舶的人员配备越来越少，对电的要求越来越高，需要船舶电站的自动化、智能化的程度也要相应的提高。准确的电力系统负荷预估，可以经济合理地安排船舶发电机组的启停，保持电网的安全稳定性，减少不必要的后备能量储备，合理安排机组检修计划，有效降低成本并提高船舶运行的效能。

1.5.1 船舶电力系统负荷预估的基本步骤

(1) 调查和选择历史负荷数据资料，选择不同航次典型工况下的船舶电力负荷数据。

(2) 负荷数据的预处理。在经过对数据资料初步筛选之后，对资料进行数据分析预处理，即对数据中的异常值进行平稳化处理和进行缺失数据的补遗。

(3) 建立负荷预估模型进行负荷预估分析。选择合适的负荷模型以进行负荷预估，可同时采用几种模型进行运算，以便对比选择。

(4) 后期修正。根据船舶电力系统后期运行的实际情况，对先前负荷模型进行修正完善。

1.5.2 船舶电力系统负荷预估传统方法

目前，国内对船舶电力系统运行负荷估算的常用算法是三类负荷法和计算机仿真法，这两种算法都基于电力负荷的分类随机模型。所谓电力负荷的分类随机模型是指：所有电力负荷是随机工作的，把工作概率相近的负荷划分到一类，则每类负荷同时工作的概率服从于二维分布，其合成功率等于负荷的总功率乘以此类负荷的概率，总的合成功率等于各类负荷的合成功率之和。

三类负荷法把电力负荷按照工作概率划分为 3 类，每类负荷按照一个工作概率计算，三类负荷的合成功率即为总的合成功率。显然，这种方法的分类比较粗，计算结果容易产

生较大偏差。

计算机仿真法将所有负荷的有功功率排成一个 $n \times m$ 的矩阵, 其中: n 为划分的工作概率挡次数, m 为各工作概率挡次中负荷最多一挡那组负载的个数; 而矩阵元素 P_{ij} 为属于第 i 挡概率并排在第 j 位的负荷的有功功率 (若某一位置上没有负载, 则相应的元素取为 0), 然后用计算机产生随机数对每列负荷逐列进行抽签, 每次抽签的一列负荷中工作概率大于随机数的负荷工作 (有功功率相加), 把 m 次抽签的功率进行相加得到一个船舶电力负荷总功率; 重复计算多次 (例如 1000 次) 后, 可以绘出船舶电力负荷的功率—频数分布曲线; 按功率—频数分布曲线求其加权平均值并定为全船电力负荷的期望功率值。这种方法的缺点是: 每列负荷的有功功率值可能相差较大, 这会使全船电力负荷功率分布的方差变大; 计算的功率最大值比较随机, 无实际意义。

1.5.3 基于支持向量机的船舶电力系统负荷预估方法

针对船舶电力系统负荷预估传统方法存在的不足, 将支持向量机方法用于船舶电力系统负荷预估。支持向量机 (SVM, Support Vector Machine) 是 Vapnik 等人根据统计学理论提出的一种新的机器学习方法, 它是建立在统计学习理论的 VC 维 (Vapnik Chervonenks Dimension) 理论和结构风险最小原理 (Structural Risk Minimization) 基础上的, 能较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题。而船舶电力系统的负荷预估问题也可以看作是一种对电力负荷及其影响因子间的复杂非线性函数关系的逼近问题, 因此可将向量机理论引入船舶电力系统的负荷预估之中。

2 船舶电力系统的潮流计算方法

船舶电力系统为有限惯性系统, 电站、配电和用电环节之间存在强耦合。电力系统网络常采用辐射网和环网两种形式, 主配电板下层方向配电网呈辐射状, 且具有弱网状结构, 即系统内回路数量有限, 在数学中, 表现为矩阵稀疏性增强。

一般来说, 船舶电力系统 X/R 较小 (陆用输电网 X/R 典型值范围为 5~10, 船舶电缆典型值范围为 0.1~2)。加之受船舶长度、体积的限制, 电缆长度短, 潮流计算中雅可比矩阵呈现病态, 采用常规潮流计算方法如牛顿—拉夫逊法、快速解耦等方法时不收敛。

鉴于上述原因, 可借鉴陆用电力系统低压配电网潮流计算方法进行船舶电力系统潮流分析。常采用的方法有: 回推—前推算法、Zbus 法、回路阻抗法、改进牛顿法等。上述方法仍存在一定缺点, 如回推—前推算法无法处理多环路潮流; Zbus 法处理 PV 节点的能力较弱, 求解时间较长, 算法效率低; 回路阻抗法虽然处理网孔能力较强, 但处理 PV 节点的能力依然较弱; 改进牛顿法仍然对初值的选取敏感。为了满足船舶电力系统潮流计算的需要, 这里介绍一种基于节点电动势的船舶电力系统潮流计算方法。

2.1 基本假设

为简化计算, 作以下假设:

- (1) 保持系统中某节点的电动势不变, 通常取某一台发电机的节点电压 (由自动电压调节装置保证)。
- (2) 发电机间的有功和无功功率分配关系确定 (由自动调频调载装置保证)。
- (3) 发电机的转差率近似为零。

2.2 计算方法及步骤

采用节点电势法, 将整个船舶电力系统看作由节点 (母线、配电板、配电箱等) 和支路 (馈线、跨接线、负载等) 组成, 而把发电机电源作为相应节点的电流源来处理。这样, 可用节点—支路关联矩阵 $[M]_{n \times m}$ (n 为节点总数, m 为支路总数) 和支路导纳对角阵 $[y_b]_{m \times m}$ 来描述, 于是得节点网络方程

$$[\dot{Y}_y][\dot{U}_n] = [\dot{I}_n] \quad (4.4-53)$$

式中: $[\dot{U}_n]_{n \times 1}$ 为节点电动势列相量, $[\dot{I}_n]_{n \times 1}$ 为节点的合成电流源, $[\dot{Y}_y]$ 为节点导纳矩阵。

$$[\dot{Y}_y]_{n \times n} = [M][y_b][M]^T \quad (4.4-54)$$

由于船舶电力系统的负载大多为异步电动机, 其压降与负载电流成非线性关系, 因而不能直接求解, 而采用逐次逼近的迭代方法。将各节点电动势初始值设为额定值, 得支路压降

$$[\dot{U}_b] = [M]^T[\dot{U}_n] \quad (4.4-55)$$

然后根据各线路阻抗、静态负载和异步电动机的参数求出各自的电流 \dot{i}_b 及功率 \dot{s}_i , $i=1, 2, \dots, m$, m 为支路数 (包括负载), 其中的静态阻抗支路及馈线支路, 给定支路阻抗值 \dot{z}_b , 就可根据支路电压 \dot{u}_b 求得支路电流 \dot{i}_b

$$\dot{i}_b = \frac{\dot{u}_b}{\dot{z}_b} \quad (4.4-56)$$

系统总消耗功率为

$$\sum \dot{S} = \sum_{i=1}^T \dot{s}_i \quad (4.4-57)$$

式中: $\sum \dot{S}$ 为系统总消耗功率; T 为负载及馈线支路的数量。

依据调频调载的作用, 第 r 台发电机所分担的功率 \dot{s}_{gr} 为

$$\dot{s}_{gr} = k_{pr} \operatorname{Re}(\sum \dot{S}) + j k_{qr} \operatorname{Im}(\sum \dot{S}) \quad (4.4-58)$$

式中: k_{pr} 、 k_{qr} 为发电机间的有功和无功功率分配系数。

从而节点 i 的合成注入电流源为

$$\dot{i}_i = \left[\left(\sum_{r \in i} \dot{s}_{gr} \right) / \dot{u}_i \right]^* \quad (4.4-59)$$

式中: $r \in i$ 表示第 r 台发电机直接连接到节点 i , $[\dot{u}_i]^*$ 表示节点 i 电动势的共轭值。

发电机支路电流可根据发电机的功率 \dot{s}_g 采用下面的公式计算

$$\dot{i}_b = \left(\frac{\dot{s}_g}{\dot{u}_b} \right)^* \quad (4.4-60)$$

由式 (4.4-53) 和式 (4.4-59), 求取节点电动势的叠代公式

$$[\dot{U}_n]^{(k+1)} = [\dot{Y}_y]^{-1} \left[\left(\sum_{r \in i} \dot{s}_{gr}^{(k)} \right) / \dot{u}_i^{(k)} \right]^* \quad (4.4-61)$$

式中: $[\dot{Y}_y]^{-1}$ 为 $[\dot{Y}_y]$ 的逆矩阵; $\dot{u}_i^{(k)}$ 为第 k 步迭代过程中节点 i 的电动势向量。

为了避免求矩阵 $[\dot{Y}_y]$ 的逆, 同时为了提高叠代过程的收敛速度, 将 $[\dot{Y}_y]$ 分成上三角阵、对角阵和下三角阵, 采用高斯迭代法求解节点电动势

$$\dot{u}_i^{(k+1)} = \frac{1}{\dot{y}_{yy}} \left[\frac{\left(\sum_{r \in i} \dot{s}_{gr}^{(k)} \right)^*}{(\dot{u}_i^{(k)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \dot{y}_{yj} \dot{u}_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n \dot{y}_{yj} \dot{u}_j^{(k)} \right] \quad (4.4-62)$$

式中: $\dot{u}_i^{(k)}$ 为第 k 步计算出的节点 i 的电动势; $\dot{u}_j^{(k+1)}$ 为第 $k+1$ 步计算出的节点 j 的电动势; \dot{y}_{ij} 为 $[\dot{y}_y]$ 中第 i 行第 j 列的元素。

迭代结束条件根据基尔霍夫电流定律 (KCL) 选定

$$\max |\dot{i}_y^{(k)}| \leq \epsilon_1 \quad (4.4-63)$$

式中: $\dot{i}_y^{(k)}$ 为连接节点 i 的所有发电机、负载及馈线电流之和; ϵ_1 为预先设定的误差值。

系统计算流程图如图 4.4-3 所示。

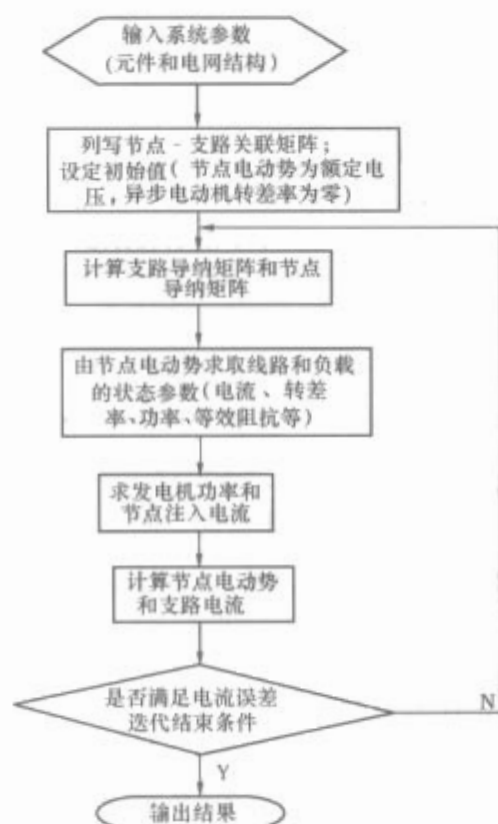


图 4.4-3 系统计算潮流框图

3 船舶电力系统电磁暂态分析与仿真

3.1 十二相发电机突然短路电流分析

十二相发电机是由四组互移 15° 、Y 连接的三相绕组构成的。其整流系统直流侧突然短路时的电路图如图 4.4-4 所示。

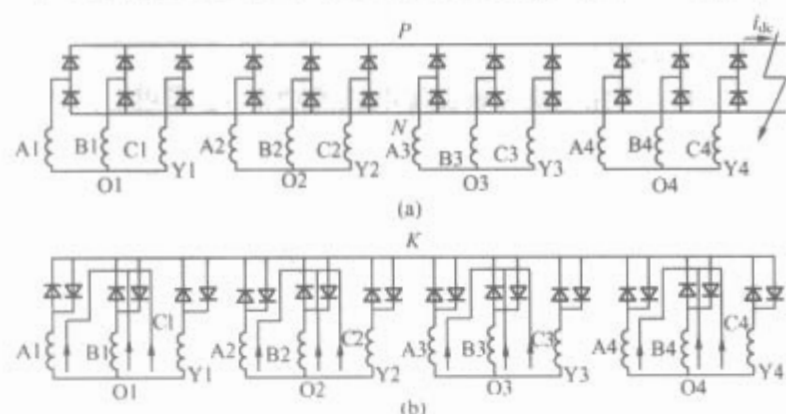


图 4.4-4 十二相发电机整流系统直流侧突然短路时的电路图

3.1.1 交流侧短路电流

将 abc 坐标系变换为 dq 坐标系, 可得

$$u_{di0} = 0 \quad (4.4-64)$$

$$u_{qi0} = U_{0m} \quad (4.4-65)$$

直流侧发生突然短路时, 对于交流侧而言, 等效于突然十二相对称短路, 所以可得电压方程

$$p\psi_{di}^1 - \psi_{di}^1 - r_{di} i_{di} = -u_{di0} \mathbf{1} = 0 \quad (4.4-66)$$

$$p\psi_{qi}^1 - \psi_{qi}^1 - r_{qi} i_{qi} = -u_{qi0} \mathbf{1} = -U_{0m} \mathbf{1} \quad (4.4-67)$$

式中: ψ_{di}^1 和 ψ_{qi}^1 为短路后相应磁链的增量, 可用如下的磁链方程表示

$$\psi_{di}^1 = -x_{dy}(p) i_{di} - x_{dm}(p) \sum_{j=1, j \neq i}^4 i_{dj} \quad (4.4-68)$$

$$\psi_{qi}^1 = -x_{qy}(p) i_{qi} - x_{qm}(p) \sum_{j=1, j \neq i}^4 i_{qj} \quad (4.4-69)$$

式中: $x_{dy}(p)$ 和 $x_{qy}(p)$ 分别为单个三相 Y 绕组的 d 轴和 q 轴运算电抗; $x_{dm}(p)$ 和 $x_{qm}(p)$ 分别为各个三相 Y 绕组之间的 d 轴和 q 轴运算互电抗; 相应的超瞬变电抗、瞬变电抗和同步电抗分别为 x''_{dy} 、 x''_{dm} 、 x''_{qy} 、 x''_{qm} 、 x'_{dy} 、 x'_{dm} 和 x_{dy} 、 x_{dm} 、 x_{qy} 、 x_{qm} 。

将磁链方程代入电压方程, 可得

$$-p \left[x_{dy}(p) i_{di} + x_{dm}(p) \sum_{j=1, j \neq i}^4 i_{dj} \right] + \left[x_{qy}(p) i_{qi} + x_{qm}(p) \sum_{j=1, j \neq i}^4 i_{qj} \right] - r_{di} i_{di} = 0 \quad (4.4-70)$$

$$-p \left[x_{qy}(p) i_{qi} + x_{qm}(p) \sum_{j=1, j \neq i}^4 i_{qj} \right] + \left[x_{dy}(p) i_{di} + x_{dm}(p) \sum_{j=1, j \neq i}^4 i_{dj} \right] - r_{qi} i_{qi} = -U_{0m} \mathbf{1} \quad (4.4-71)$$

因式 (4.4-70) 和式 (4.4-71) 中 i_{d1} 、 i_{d2} 、 i_{d3} 、 i_{d4} 和 i_{q1} 、 i_{q2} 、 i_{q3} 、 i_{q4} 都具有对称性, 故有 $i_{d1} = i_{d2} = i_{d3} = i_{d4}$ 和 $i_{q1} = i_{q2} = i_{q3} = i_{q4}$ 。实际上, 对式 (4.4-70) 和式 (4.4-71) 分别取 $i=1$ 和 $i=2$, 再将两式相减, 便可得

$$\begin{aligned} & -\{r + p[x_{dy}(p) - x_{dm}(p)]\} (i_{d1} - i_{d2}) + \\ & [x_{qy}(p) - x_{qm}(p)] (i_{q1} - i_{q2}) = 0 - \\ & \{r + p[x_{qy}(p) - x_{qm}(p)]\} (i_{q1} - i_{q2}) + \\ & [x_{dy}(p) - x_{dm}(p)] (i_{d1} - i_{d2}) = 0 \end{aligned}$$

因

$$\{r + p[x_{dy}(p) - x_{dm}(p)]\} \{r + p[x_{qy}(p) - x_{qm}(p)]\} + [x_{dy}(p) - x_{dm}(p)][x_{qy}(p) - x_{qm}(p)] \neq 0$$

故有 $i_{d1} - i_{d2} = 0$, $i_{q1} - i_{q2} = 0$, 进而可得出下列关系式

$$i_{d1} = i_{d2} = i_{d3} = i_{d4} = \frac{i_d}{4} \quad (4.4-72)$$

$$i_{q1} = i_{q2} = i_{q3} = i_{q4} = \frac{i_q}{4} \quad (4.4-73)$$

$$\psi_{di}^1 = -x_d(p) i_{di} \quad (4.4-74)$$

$$\psi_{qi}^1 = -x_q(p) i_{qi} \quad (4.4-75)$$

式中: $x_d(p) = x_{dy}(p) + 3x_{dm}(p)$ 和 $x_q(p) = x_{qy}(p) + 3x_{qm}(p)$ 分别为十二相电机四 Y 绕组的 d 轴和 q 轴运算电抗。超瞬变电抗、瞬变电抗和同步电抗也有类似关系, 即 $x''_d = x''_{dy} + 3x''_{dm}$, $x''_q = x''_{qy} + 3x''_{qm}$; $x'_d = x'_{dy} + 3x'_{dm}$; $x_d = x_{dy} + 3x_{dm}$, $x_q = x_{qy} + 3x_{qm}$ 。

于是式 (4.4-70) 和式 (4.4-71) 可写作

$$[r + px_d(p)] i_{di} - x_q(p) i_{qi} = 0 \quad (4.4-76)$$

$$x_d(p) i_{di} + [r + px_q(p)] i_{qi} = U_{0m} \mathbf{1} \quad (4.4-77)$$

忽略定、转子电阻的高阶小量, 可解得

$$i_{di} = \frac{i_d}{4} = \left[\left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau_d}} + \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_d}} + \frac{1}{x_d} \right] U_{0m} \mathbf{1}$$

$$-\frac{U_{0m}}{x_d} e^{-\frac{t}{T_d}} \cos t \mathbf{1} \quad (4.4-78)$$

$$i_{qi} = \frac{i_q}{4} = U_{0m} e^{-\frac{t}{T_d}} \quad (4.4-79)$$

$$\psi_{di} = -x_d(p) i_{di} = -U_{0m} \mathbf{1} + U_{0m} e^{\frac{t}{T_d}} \cos t \mathbf{1} \quad (4.4-80)$$

$$\psi_{qi} = -x_q(p) i_{qi} = -U_{0m} e^{\frac{t}{T_d}} \sin t \mathbf{1} \quad (4.4-81)$$

将 d 、 q 坐标系变换为 a 、 b 、 c 坐标系, 得

$$i_{ai} = \left[\left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{1}{x_d} \right] \times \\ U_{0m} \cos \left[t + \theta_0 + \frac{\pi}{8} - (i-1) \frac{\pi}{12} \right] \mathbf{1} - \\ \frac{U_{0m}}{2} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) e^{\frac{t}{T_d}} \cos \left[2t + \theta_0 + \frac{\pi}{8} - (i-1) \frac{\pi}{12} \right] \mathbf{1} - \\ \frac{U_{0m}}{2} \left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} \right) e^{\frac{t}{T_d}} \cos \left[\theta_0 + \frac{\pi}{8} - (i-1) \frac{\pi}{12} \right] \mathbf{1} \quad (4.4-82)$$

将上式中的 θ_0 分别用 $\theta_0 - \frac{2\pi}{3}$ 和 $\theta_0 + \frac{2\pi}{3}$ 替换, 就可得到 i_{bi} 和 i_{ci} 。

以上各式中:

$$T_d'' = \frac{x_d''}{x_d'} T_d', T_d' = \frac{x_d'}{x_d} T_d, T_a = \frac{1}{r} \frac{2x_d'' x_q''}{x_d'' + x_q''}.$$

由 i_{ai} 、 i_{bi} 、 i_{ci} 的表达式可知, 当 t 为某一适当的数值时, 定子某相电流达到最大值, 而各相电流的最大值则与短路起始角 θ_0 有关。

3.1.2 交流侧最大短路电流

对于空载状态下直流侧突然短路的情况, 考虑到通常有 $x_d'' \approx x_q''$, 故由式 (4.4-82) 可知, 若忽略电流的衰减, 则当 $\theta_0 = \frac{\pi}{24}$, $t = \frac{T_s}{2}$ 时, i_{a3} 取得最大值 $\frac{2U_{0m}}{x_{dy}}$, 这也就是交流

侧的最大短路电流 $i_{\phi_{max}}$ 。当考虑电流的衰减时, 交流侧的最大短路电流为

$$i_{\phi_{max}} = -i_{a3} \mid_{\theta_0 = \frac{\pi}{24}, t = \frac{T_s}{2}} \\ = U_{0m} \left[\left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\frac{T_s}{2T_d}} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{T_s}{2T_d'}} + \frac{1}{x_d} \right] + \\ \frac{U_{0m}}{x_d} e^{-\frac{T_s}{2T_d}} \quad (4.4-83)$$

式中: T_s 为交流量的周期 (2π rad)。

3.1.3 直流侧最大短路电流

三相整流系统直流侧短路电流峰值等于交流侧相电流的最大值, 而后者的大小与短路起始角 θ_0 有关, 因而三相整流系统短路起始角对直流侧短路电流峰值有较大的影响。

十二相整流系统短路起始角对直流侧短路电流峰值的影响很小。直流侧短路电流峰值最大值 $i_{dc_{pmax}}$ 即为直流侧最大短路电流 $i_{dc_{max}}$ 有

$$i_{dc_{max}} = i_{dc_{pmax}} \\ = i_{dc} \mid_{\theta_0 = 0, t = \pi} \\ = 3.831 i_{\phi_{max}} \quad (4.4-84)$$

3.2 船舶电力系统电磁暂态时域仿真

3.2.1 电磁暂态程序 (EMTP) 简介

目前, 普遍采用的电磁暂态仿真程序 (Electromagnetic Transients Program, 简称 EMTP) 是用数值计算方法对电力系统中从数微秒至数秒之间的电磁暂态过程进行仿真模拟, 主要用于计算电力系统中的电磁暂态过程。

3.2.2 船舶电力系统电磁暂态时域仿真

由于船舶电力系统的特殊性, 其事故越来越难以用传统的分析方法进行预测。另外, 新的电气研究也需做各种试验, 但无论从现有技术还是从供电的可靠性及设备的安全性考虑, 直接在实际的电力系统中进行科学研究, 可能性很小。因此, 运用电力系统仿真技术成为迫切的需要。

电力系统仿真就是通过数字计算机上建立适当的数学模型来模拟电力系统物理过程的一种研究方法。由于实际电力网络拓扑系统变得越来越复杂, 于是掌握模拟仿真计算机软件就变得越来越重要。随着计算机技术的不断发展, 电力系统仿真软件已经成为电力系统工作者进行电力系统规划、保护及故障研究的重要工具。数字仿真因其具有投资小、功耗低、占地少、具有较强的灵活性和扩充性、试验重复性好和自动化程度高等优点而被广泛使用。

下面是综合电力系统模拟实验系统的数值计算与实验结果, 其中采用三相交流发电机、异步电动机, 推进电动机变压器采用 24 脉冲移相变压器。

380V 母线三相短路时, 两台发电机的总电流实验波形及计算波形如图 4.4-6 所示。

380V 母线三相短路时, 侧推异步电动机的反馈电流实验波形及计算波形如图 4.4-7 所示。

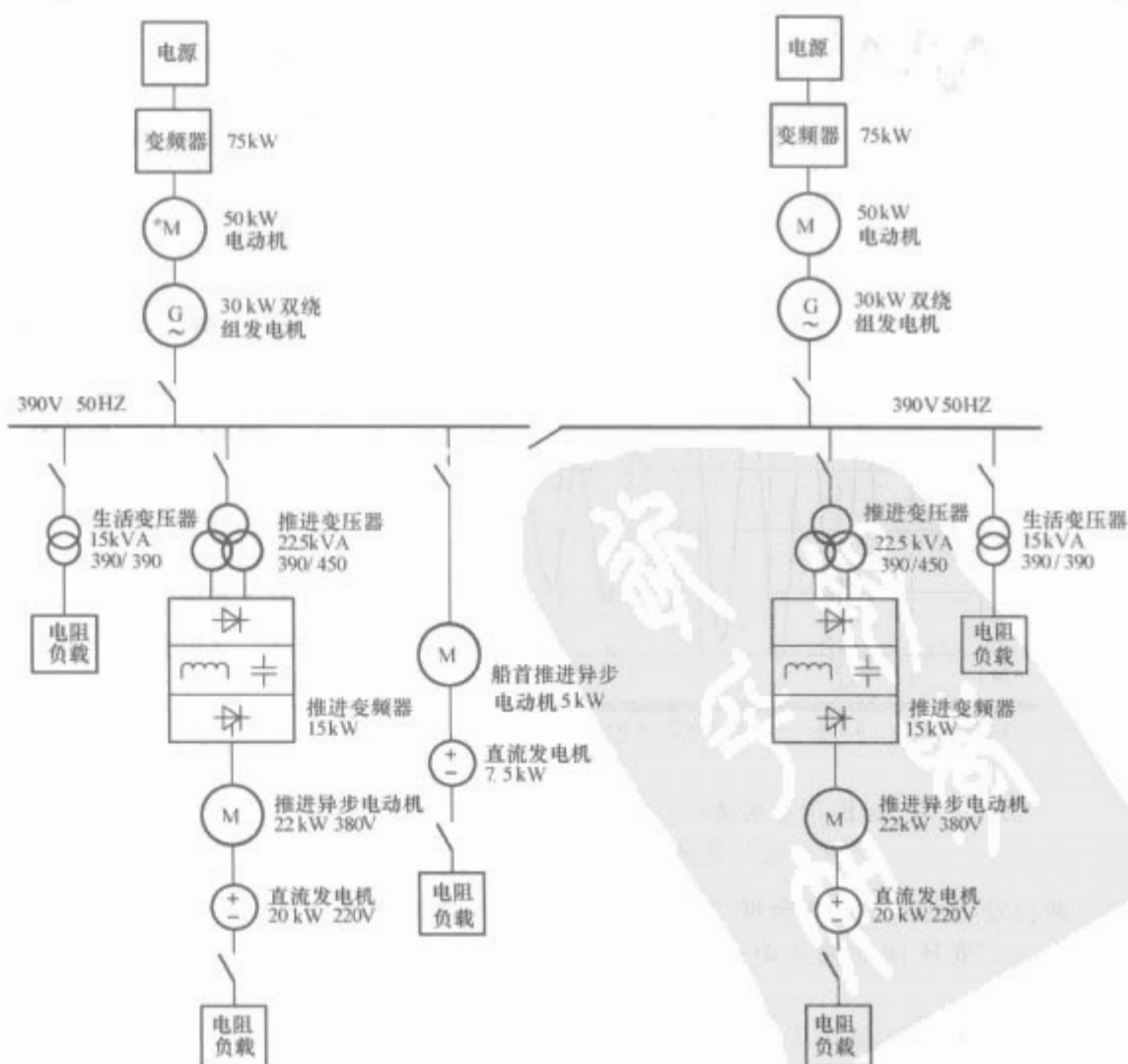


图 4.4-5 船舶电力系统仿真图

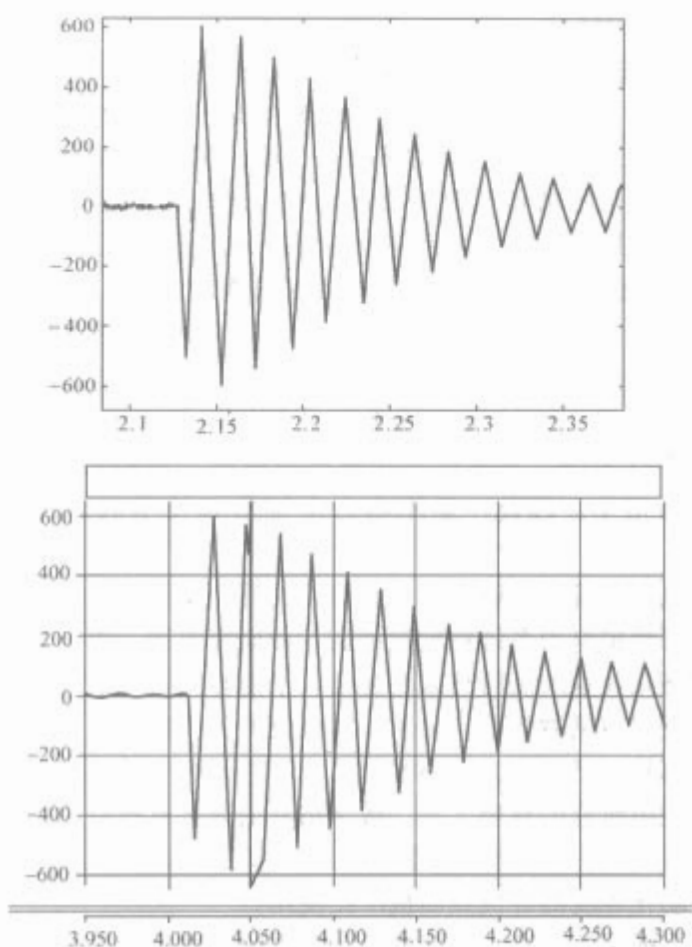


图 4.4-6 两台发电机的总电流实验波形及计算波形

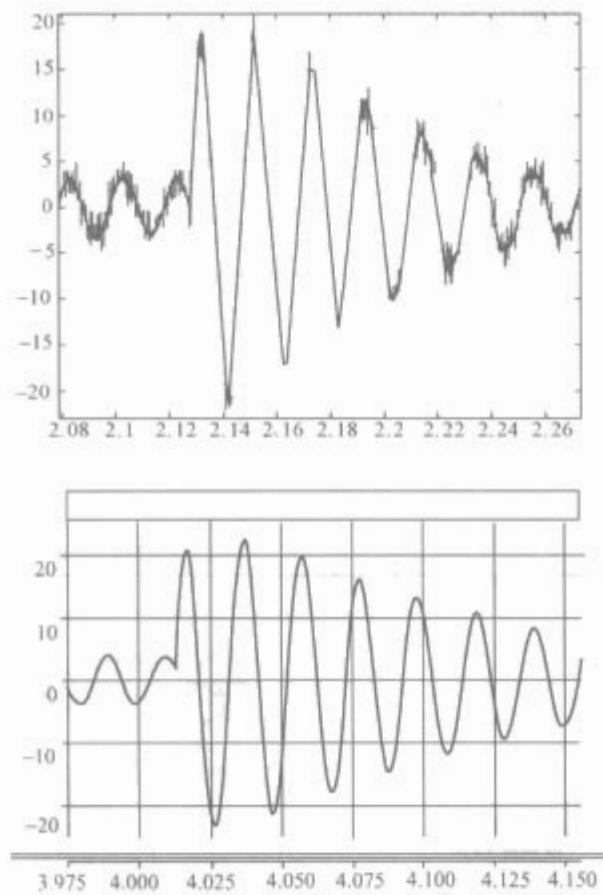


图 4.4-7 侧推异步电动机的反馈电流实验波形及计算波形

两台发电机工作，两台推进电动机均带 100% 负载时，22.5°~7.5° 变压器的输入电流实验采集及计算波形如图 4.4-8 所示。

仿真结果与实验结果相吻合，说明计算机仿真的正确性。

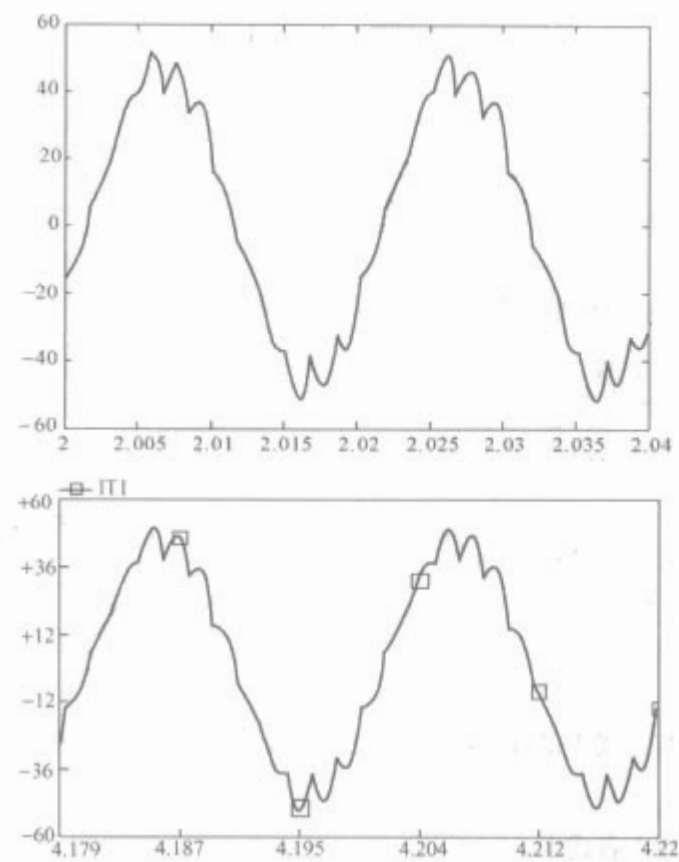


图 4.4-8 22.5°~7.5° 变压器的输入电流实验采集及计算波形

4 船舶电力系统稳定性分析

所谓电力系统运行的稳定性是指处于稳态负荷状态下运行的电力系统受到了干扰后仍能恢复到稳态运行的能力。如果发生扰动的结果是建立新的正常状态，则认为其扰动前所处的初始状态是“稳定的”；如果扰动后不再建立新的正常运行状态，则其初始状态是“不稳定的”。在船舶电力系统运行中，后一种情况也是有可能发生的，例如当同步发电机转子轴上的转矩大于最大电磁转矩，转矩平衡条件被破坏，转子开始滑动，发电机失步，这时可观察到转子增幅振荡。

确定船舶电力系统尤其是多状态变量复杂船舶电力系统的稳定性是一项繁琐的工作，通常需要借助计算机和各种模拟技术。本节就对稳定性问题的基本概念和分析计算的实用方法作简要的介绍。

4.1 静态稳定性分析

系统静态稳定性破坏的主要特征是发电机组失去同步，一般有以下三种情况，如图 4.4-9 所示。发电机的功角 θ 单调增长（曲线 1），称为稳定的非周期破坏；发电机的功角 θ 作发散性的振荡（曲线 3），称为稳定的周期性破坏；发电机功角 θ 作等幅振荡（曲线 2），这种情况下发电机功角虽不是逐渐增大，但却会引起发电机产生频率为 3~8Hz 的摆动，这也是电力系统运行所不允许的。前两种情况是在小扰

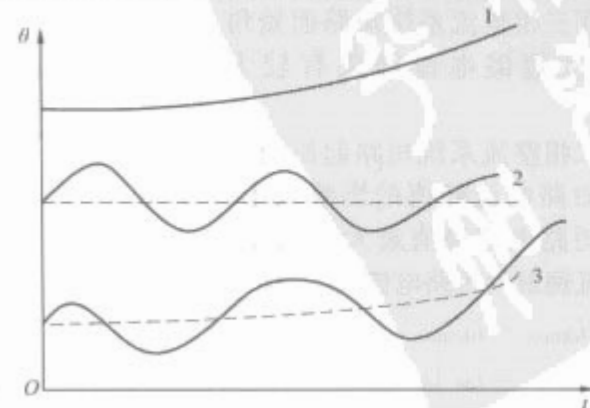


图 4.4-9 静态稳定破坏

动下电力系统经常发生的静态稳定破坏,而后一种情况,往往是原动机(或脉冲负荷)引起的周期扰动或者电网本身的振荡因素所造成的。

4.1.1 小振荡方法

目前,关于船舶电力系统静态稳定的计算机仿真分析计算,主要采用小振荡方法。该方法基于李雅普诺夫关于运动稳定性的理论。它在理论上比较严格,适用于任何结构形式的系统,并可考虑相关的各种因素,但计算工作量较大,对于多机组船舶电力系统,只有借助于计算机才能进行计算分析。采用小振荡法判别电力系统某一运行状态是否稳定分以下步骤:

(1) 列出描述系统运动的方程组。用一系列微分方程和代数方程来描述电力系统遭受扰动后,系统各个运行参数的变化规律,这些方程通常为非线性方程。我们可以把它们写成以下一般形式

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = \phi_i(x_1, x_2, \dots, x_m, y_1, y_2, \dots, y_n) (i = 1, 2, \dots, m) \\ F_j(x_1, x_2, \dots, x_m, y_1, y_2, \dots, y_n) = 0 (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (4.4-85)$$

式中:第一组为微分方程;第二组为代数方程; x_1, x_2, \dots, x_m 及 y_1, y_2, \dots, y_n 为系统有关的运行参数。

(2) 将方程组在所研究的运行工况附近线性化,求出“一次近似”方程组,并消去其中的代数方程组,得出一组常系数线性微分方程组

$$\frac{d\Delta x_i}{dt} = A_{i1}\Delta x_1 + A_{i2}\Delta x_2 + \dots + A_{im}\Delta x_m \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4.4-86)$$

式(4.4-86)的系数组成的矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mm} \end{bmatrix} \quad (4.4-87)$$

(3) 由线性微分方程系数矩阵式(4.4-87)得出以下特征方程式,根据此特征方程式根的性质判断系统稳定性。

$$D(p) = \begin{vmatrix} A_{11} - p & A_{12} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} - p & \dots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mm} - p \end{vmatrix} = 0 \quad (4.4-88)$$

或

$$|A - pI| = 0$$

由常微分方程的稳定性理论可知,稳定的充分必要条件为:所有的根 p_1, p_2, \dots, p_m 都具有负的实部(负实根或实部为负的复根)。

根据特征方程式根的性质来判断稳定性的方法,一般可以分为两类。

1) 采用间接的稳定判据,如罗斯—霍尔维茨判据、奈魁斯特—米哈依洛夫判据、D—域法等。这类方法不需要直接求出特征方程式的全部根,而是根据特征方程式的系数来判断根的性质。

2) 用计算矩阵特征值的方法,直接计算特征方程式的全部根。

小振荡法不仅可以判断系统某一运行工况的稳定性,还可以用来确定系统的静态稳定储备,分析某一参数(如发电机、线路及调节系统的各种参数)对系统静态稳定的影响。

4.1.2 实用计算方法

实用计算方法是在一定简化条件下,用实用判据判断稳

定性的一种方法。由于该方法比较简单,计算工作量小,因此应用较广。特别是在电力系统设计阶段,原始数据比较粗略,某些参数还不能完全确定,用实用算法进行计算可以较快对结果作出估计。这种方法的不足之处是作了一些简化假定,在使用上有一定的局限性。

通常采用的简化假设有:

(1) 假定系统不产生自发振荡,计算中不考虑发电机的阻尼。

(2) 用假定某一电动势值恒定的办法来近似模拟发电机电磁瞬态过程和励磁调节系统的作用。

(3) 不考虑原动机调速系统的作用。

实用判据一般是电力系统中某一运行参数对另一运行参数的导数,按照它们的符号正负来判断系统的稳定性。常用的实用判据有 $dP/d\theta$ 和 dQ/dV 。

$dP/d\theta$ 为某一发电机的输出功率 P 对其功角 θ 的导数,通常称为同步功率。 $dP/d\theta$ 判据用于检验系统是否会因传输的有功功率过大,或者发电机的相对角度过大而失去静态稳定。

dQ/dV 为发电机无功功率 Q 对电压 V 的导数。 dQ/dV 判据用于检验在电源的无功容量不足,运行电压水平较低的情况下,是否会由于某些节点上无功负荷的微小变化而引起节点电压的不断下降,破坏系统运行的稳定性。这种现象通常称为电压崩溃现象。

4.2 几种特殊工况下船舶电力系统稳定性分析

4.2.1 两台或两台以上发电机并联运行稳定性分析

多机电力系统的稳定判据要比单机系统复杂很多。以两台机系统为例,发电机发出的功率与功角之间的关系可以用发电机的内电动势 E_1, E_2 及其输入阻抗 Z_{11}, Z_{22} 和转移阻抗 Z_{12} 表示为

$$\begin{cases} P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin (\theta_{12} - \alpha_{12}) \\ P_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin (\theta_{12} + \alpha_{12}) \end{cases} \quad (4.4-89)$$

$$\theta_{12} = \theta_1 - \theta_2$$

式中: θ_{12} 为发电机1和2转子间的相对角度 $\alpha_{11}, \alpha_{22}, \alpha_{12}$ 为阻抗 Z_{11}, Z_{22}, Z_{12} 幅角的余角,且在一般情况下, $\alpha_{12} < 0$ 。如图4.4-10所示。

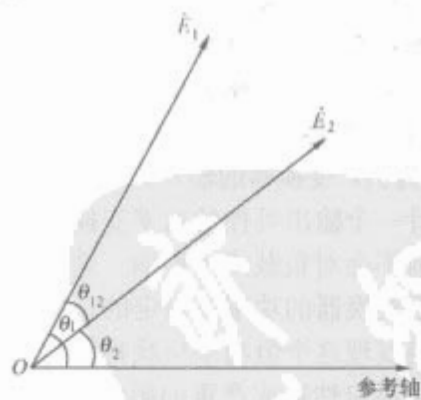


图4.4-10 发电机组转子间的相对角度

假定发电机的电动势均保持不变时,它们发出的功率将只取决于发电机1和2的转子间的相对角度 θ_{12} ,其功率特性曲线如图4.4-11所示。

对于并联系统的稳定性,我们还可以采用动态稳定计算方法,即瞬态过程求解方法。求出系统的运动情况,然后判断它们的稳定性。由于描述电力系统瞬态过程的方程比较复杂,而且因为故障和操作的缘故,其中有些方程是不连续的,因此方程的解一般不能取得解析的形式,而只能用某种

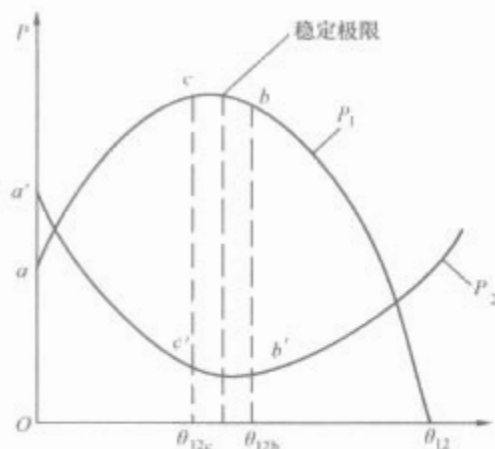


图 4.4-11 两机系统功率特性曲线

数值解法离散地求出对应于某一时间序列 $t_0, t_1, t_2 \dots t_m$ 的系统运行参数, $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_m, y_m)$ 。由于通常是以 t 时刻 $x = x(t)$ 作为初值, 用微分方程的数值法求出 $x = x(t + \Delta t)$, 然后再把 $x(t + \Delta t)$ 作为已知量代入相应的代数方程求出 $y(t + \Delta t)$ 。严格地说, 不同时刻的值是不能满足方程组的。故这些运行参数解是有误差的(交接误差)。为了消除这种误差可以采用以下两种方法:

(1) 对交替法进行迭代, 也即将交替解得到的值重新代入微分方程, 求得 $x_{(t+\Delta t)}^{(1)}$, 再将其代入代数方程求出 $y_{(t+\Delta t)}^{(1)}$, 这样反复迭代下去, 直到 $y_{(t+\Delta t)}^{(m)} \approx y_{(t+\Delta t)}^{(m+1)}$ 为止。

(2) 采取微分方程和代数方程联立求解的方式, 也即先将微分方程用某种数值解法化为差分方程, 然后将该差分方程和代数方程联立求解。在这种情况下, $x(t + \Delta t), y(t + \Delta t)$ 是同时求出的, 因此可以消除交接误差。

推算出 $t + \Delta t$ 时刻系统运行状态以后, 就可利用适当的判据(如发电机之间的相对角度是否大于规定值等)判断系统是否稳定。如已判明系统失去稳定, 计算即可结束。否则应该继续推算下一时刻系统的运行状态, 一直到预定的某一时刻。

4.2.2 带电力电子变流装置的电力系统稳定性分析

在基于直流区域配电方式的船舶电力系统网络中, 使用了大量的电力电子设备。基于电力电子装置的配电系统(PEDSs)具有很好的负载调节和瞬态特性, 如果采用适当的结构还可以具有很高的故障容错性, 它们特别适合于完全独立或半独立的配电系统中。然而, PEDSs 具有一些缺点, 其中之一就是其负阻抗特性可能会引起系统不稳定。此类不稳定是由现代功率变换器接近理想的调节能力所引起的。以 DC/DC 变换器为例, 变换器的输入是配电母线, 输出是用电负载。可以设计一个输出可控的功率变换器, 在功率变换器输入端的扰动就不会对负载产生影响。这样, 相对于输入电压来说, 输入至变换器的功率是恒定的, 从小信号分析的角度, 可以很容易发现这个恒功率负载特性与负电阻相似, 而负电阻会给系统稳定性造成严重的影响。由此, PEDSs 的稳定性分析与传统的配电系统的稳定性分析相比显得更为重要。

大多数的 PEDSs 的稳定性分析均基于阻抗/导纳的方法。这些方法的依据为: 对于单一直流母线系统, 可以通过计算电源的阻抗(Z_s)与负载的导纳(Y_l)的乘积获得奈奎斯特曲线, 以此确定给定工作点的小信号稳定性。这些阻抗/导纳的方法最直接的应用就是 Middlebrook 判据, 即如果 $Z_s Y_l$ 的奈奎斯特曲线保持在单位圆内, 那么这个系统是稳定的。这种方法最重要的特点就是它是针对设计提出的。例如给定电源的阻抗时, 很容易确定保证在小信号意义上系统稳定的负载导纳边界。由于大多数的 PEDSs 是由多家厂商

(比较典型的的就是由一个系统集成商以及多个子承包商或制造商)合作完成, 而不是由一家公司完成的, 所以稳定性判断方法在设计时就显得更加重要。

以一单母线直流功率系统的阻抗稳定性分析为例说明奈奎斯特理论的导纳/阻抗稳定性分析方法。如图 4.4-12 所示, u_s 和 Z_s 表示线性化电源变换器模型的戴维南等效电压和阻抗, u_l 和 Z_l 表示线性化负载变换器模型的戴维南等效电压和阻抗, i_s 和 i_l 分别表示流入两个变换器的电流。从图 4.4-12 中, 很清楚地得出

$$u = \frac{Z_l}{Z_s + Z_l} u_s + \frac{Z_s}{Z_s + Z_l} u_l \quad (4.4-90)$$

定义: $Z_s = N_s/D_s$; $Z_l = N_l/D_l$, 则式(4.4-90)可写为

$$v = \frac{N_l D_s u_s + N_s D_l u_l}{N_l D_s + N_s D_l} \quad (4.4-91)$$

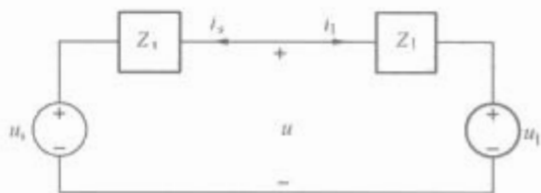


图 4.4-12 电源和负载的戴维南等效电路

如果由一个理想电源供电, 假定负载运行在稳定状态, 那么 N_l 将没有任何零点在右半平面。类似的, 如果电源给一个恒电流负载供电, 假定电源工作在稳定状态, 那么至少是在小信号意义上 D_s 将没有任何零点在右半平面。我们会发现这些准则从数学上定义了哪些元件是源、哪些元件是负荷, 并不是规定哪个元件提供或者消耗能量, 但这两种定义常常是一致的。将式(4.4-91)改写为

$$v = \frac{N_l D_s u_s + N_s D_l u_l}{N_l D_s (1 + Z_s Y_l)} \quad (4.4-92)$$

式中: Y_l 为负载导纳 ($1/Z_l$)。

由于 N_l 和 D_s 在右半平面都没有零点, 所以如果 $1 + Z_s Y_l$ 在右半平面没有零点, 则图 4.4-12 所示的系统是稳定的。由奈奎斯特理论可知, 若 Z_s 和 Y_l 都没有极点在右半平面, 闭环系统的不稳定极点数等于 $Z_s Y_l$ 的奈奎斯特曲线沿顺时针方向包围-1 点的次数。

Middlebrook 判据的主要缺点是它将导致人为的保守设计。尤其是采用这种判据时奈奎斯特平面上很多区域是不可用的, 实际上这些区域对稳定性影响很小。这种保守设计会导致控制环比其需要达到的要慢, 母线电容值比其需要的要高, 或者引入不必要的阻尼器(主动式或被动式), 引入阻尼器在很大程度上是为了满足数学公式而不是满足真正的动态稳定的需求。因此, 其他稳定判据, 如增益判据、相角裕度判据以及反向分量判据得以发展。然而, 尽管这些方法的人为保守性比 Middlebrook 判据低, 但它们为了减少人为保守性只得穿过各子系统边界移动电路元件, 而 PEDSs 由多个工程公司进行系统集成时, 就会带来麻烦。这些方法的另一个困难之处在于它们不能显式地处理不确定性、参数变化和非线性, 而是通过增益和相角裕度分配来间接处理。但是, 当裕度不够大时, 可能忽略潜在的不稳定性。因此, 目前各国仍然在对电力电子变流装置的电力系统稳定性分析进行研究。

5 船舶电力系统全数字实时仿真

5.1 船舶电力系统实时仿真概述

5.1.1 电力系统实时仿真技术

电力系统仿真分为离线仿真和实时仿真两大类。离线

仿真通常指在计算机上运行的能仿真计算电力系统各类过程的数字仿真软件程序,如 EMTPL、EMTDC、NE-TOMAC 等。实时仿真是指实时模拟电力系统各类过程,并能接入实际物理装置进行试验的电力系统仿真方式。实时仿真依据仿真模型的不同又可分为物理模拟仿真和数字实时仿真。

物理模拟仿真装置包括暂态网络分析仪(TNA)、动态模拟试验装置以及 HVDC 和 FACTS 模拟仿真器等。TNA 主要进行电磁暂态过程的研究。动态模拟主要进行机电暂态过程以及后续动态过程的研究。HVDC 和 FACTS 模拟仿真器则是利用原型 HVDC 换流器以及 FACTS 的物理模拟装置进行 HVDC 和 FACTS 控制和保护系统的实时测试。人们在物理模拟装置的基础上,采用基于微处理器或单片机的数字发电机模型,其他元件仍采用基于相似理论的物理模型,构建基于数字电机的数模混合实时仿真系统,同时兼有 TNA 和动态模拟两者的功能,大体上还是属于物理模拟仿真的范畴。

尽管物理模拟仿真装置和基于数字发电机的数模混合实时仿真系统在电力系统的动态性能研究和试验方面一直发挥着重要作用,但由于其建模周期长、重复性差等原因,人们一直没有放弃对全数字实时仿真系统的研究开发工作。随着计算机技术、IC 制造技术和数字仿真技术的飞速发展,全数字实时仿真系统得以研制成功。其中比较有代表性的产品有加拿大 RTDS 公司研制的 RTDS 系统、加拿大 TransÉnergie 科技公司的 HYPERSIM 系统、法国 EDF 的 ARENE 系统等。随着产品的成熟,这些数字实时仿真系统在实时测试领域得到越来越多的应用。

5.1.2 国内外流行的电力系统实时仿真软件

实时数字仿真系统是大型软件系统与复杂硬件系统的结合体。就软件系统而言,以上所有商业化的产品均具有图形化的输入输出界面,具有完善的电力系统元件模型和控制系统模型,算法基本都采用基于 EMTP 的快速电磁暂态仿真算法。但在硬件结构上,由于电力系统数字实时仿真系统没有相关的国际标准可以遵循,各研制企业都在进行独立的开发和生产,选用的硬件平台各不相同。按照硬件结构的不同,目前国际上流行的实时数字仿真系统可以分为如下几类:

(1) 基于 DSP 并行处理的实时数字仿真器-RTDS。RTDS 是国际上第一套商业化的全数字实时仿真装置,采用高速数字信号处理器(DSP)芯片并行处理的硬件结构。RTDS 的 DSP 芯片采用 NEC 公司的 NEC-77240 DSP 和 AD 公司的 SHARC AD21062 DSP。RTDS 利用数学上可分割子系统的概念在各 DSP 芯片间分配计算任务,每个 DSP 通常模拟一个元件。各子系统之间的连接使用传输线模型或换流器模型。RTDS 的推广时间较长,用户较多,具有较为成熟的工程应用经验。

RTDS 研制较早,根据目前微处理器技术飞速发展的情况,RTDS 这种封闭的完全基于 DSP 硬件扩展的系统存在一些局限性:一是无法充分利用微处理器芯片的最新成果,系统升级和扩展的难度较大;二是投资和维护费用高,难以大面积推广使用。

(2) 基于微机的实时数字仿真系统。随着微处理器技术的迅速发展,微机的计算能力不断增强,基于微机的数字实时仿真系统以其成本低、升级容易、发展潜力大等特点引起了人们的广泛关注。目前普通微机已具备利用数字仿真程序完成较小规模系统实时仿真的计算能力。微机通过输入输出

接口与实际物理装置相连,可以进行装置的实时闭环试验。

微机低廉的成本和巨大的发展潜力使得基于微机的实时数字仿真系统在电力系统实时仿真与装置测试领域的应用前景相当广阔。

(3) 基于并行计算机的实时数字仿真系统。目前基于微机的数字仿真系统只能进行小规模系统的实时仿真,要实现较大规模系统的实时仿真,需要采用并行计算机体系结构。

目前,国际上采用并行计算机架构的实时数字仿真系统有以下几种。

1) 基于 SGI 并行计算机的实时数字仿真装置 HYPER-SIM。全数字式电力系统实时仿真系统 HYPERSIM 是加拿大魁北克的 TransÉnergie 科技公司开发的产品,其主要用于电磁暂态实时仿真。HYPERSIM 硬件采用基于共享存储器的多 CPU 并行处理计算机,如 SGI Origin。其仿真的规模较大,也可以用于物理装置试验。由于采用高档并行处理计算机,造价较贵。

2) 基于 HP 并行计算机的实时数字仿真装置 ARENE。ARENE 系统由法国电力公司(EDF)研究开发,主要用于电磁暂态实时仿真。

该系统的硬件为 HP 公司基于 HP-CONVE 工作站的多 CPU 并行处理计算机。到目前为止,该并行处理计算机的最大 CPU 数量已达 32 个,可以模拟较大规模的系统。由于采用 HP 工作站的并行处理计算机,所以造价较贵。

3) 基于 PC 机群(PC-Cluster)的实时数字仿真系统。PC-Cluster 是由多台高档微机通过高速网络连接实现并行处理的机群计算机。其优点是价格便宜,可扩展性好,但技术相对复杂。目前,国际上有几家公司和大学采用这种技术进行电力系统实时数字仿真系统的研制,其中包括加拿大的不列颠哥伦比亚大学(UBC)、日本的三菱、法国的 ARENE、加拿大的 TransÉnergie 科技公司以及中国的电科院等。主要用于电磁暂态实时仿真,目前均处于研制阶段。

(4) 船舶电力系统实时仿真的特点。由于传统船舶电力系统规模小,结构简单,配电也简单,所以没有实时仿真的需求。随着船舶的大型化、电力推进方式的采用,船舶电力系统的规模日益增大,结构日益复杂,供电连续性要求越来越高,传统的电网结构、配电方式、管理手段已不能满足供电连续性要求,传统的基于解析计算的分析设计方法不再适用,必须寻求现代的分析设计途径,全数字实时仿真技术是理想的选择之一。

应用实时仿真技术可以完成船舶电力系统电磁暂态实时仿真、电力系统稳定性实时仿真、电力系统实时潮流分析、电力系统优化设计与可靠性、电力系统能量管理与能量实时调度、继电保护设备、测量与控制设备运行正确性与可靠性的实时测试、控制系统动作时序的实时测试、保护策略有效性与针对性的实时测试等多方面的研究,是船舶电力系统分析、设计和论证的有效手段。

现有的实时仿真软件均是为满足陆用电力系统的分析研究目的开发的,至今还没有专用的船舶电力系统实时仿真软件问世。相对于陆用电力系统实时仿真,船舶电力系统实时仿真具备如下主要特点。

1) 系统各设备之间电气距离近,网络阻抗小,对陆用仿真系统算法的数值稳定性提出了严峻考验。

2) 系统各设备存在于船体这样一个狭小的空间,没有陆用电力系统中所谓传输线的概念,不具备陆地电力系统的稀疏型结构和解耦特征。

3) 存在多相整流发电机、双绕组发电机、变流机组等

特殊元件,没有现成的仿真模型。

可见,现有陆用电力系统软件不能直接应用于船舶电力系统,必须进行二次开发。因此,现有的通用实时仿真软件能否应用于船舶电力系统仿真目的,其处理强耦合系统的能力及其自主开发功能是考核的重点。

5.2 电力系统实时仿真算法

5.2.1 基本元件建模方法

所有电力系统元件模型均可以看作是电阻、电感和电容等基本元件模型组合而成,因此,电阻、电感和电容等基本元件的建模是研究电力系统元件建模的基础。电阻的建模比较简单,只是简单的电流电压关系;对于电感、电容器件的建模问题,实时仿真通常采用梯形积分将微分方程化为代数方程来处理,方法与离线软件 EMTP 原理一样,图 4.4-13 与图 4.4-14 是电感与电容的等效电路模型。

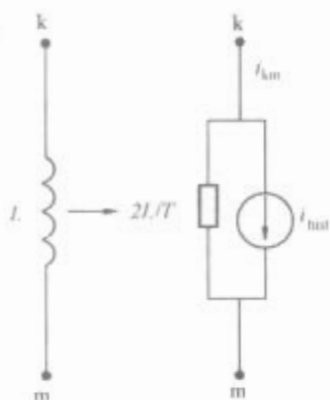


图 4.4-13 电感等效模型

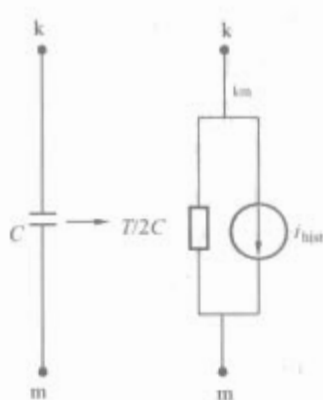


图 4.4-14 电容等效模型

5.2.2 用户模型开发方法

(1) 自建模型方法。用户自建模型可以通过编写 C 或 C++ 程序来实现,整个模型由控制模块与电气模块组成,电气模块具有内部节点和外部节点,它可通过自己的接口矩阵加入系统的导纳矩阵,从而达到修改系统导纳矩阵的目的。模型可以是线性的,也可以是非线性的。

(2) 对非线性元件的处理。非线性元件也可以等效为导纳并上一个历史电流源。所不同的是,等效出的导纳不再是常数,因此,在仿真的每个步长内必须重新计算导纳值。通常情况下,非线性元件的导纳矩阵被分为两部分,初始条件下就给定的固定导纳矩阵 Y_{ini} 和在每个步长中都要改变以更新导纳矩阵可变部分的可变导纳矩阵 Y_{add} 。所以,对于非线性元件,其导纳矩阵 Y_{eq} 为

$$Y_{eq} = Y_{ini} + Y_{add} \quad (4.4-93)$$

(3) 节点方程解决方案。采用上述对非线性元件的处理方法后,电力系统所有元件,包括线性和非线性元件,都可以等效为电阻并上一个历史电流源的形式。在节点方程 $YV = I$ 中, Y 是导纳矩阵, I 是电流矢量,其每个元素均代表流过相应节点的所有电流的代数和,包括注入节点的电流源和历史电流。流入节点的电流为正,流出节点的电流为负, V 是待求的各节点电压。

其中, Y 和 I 可由下式确定

$Y_{ii} = \Sigma$ (所有连接到节点 i 的自导纳);

$Y_{ij} = \Sigma$ (所有连接节点 i 和节点 j 的互导纳);

$I_i = \Sigma$ (流入节点 i 的电流源和历史电流—流出节点 i 的电流源和历史电流)。

设 n 为节点数,则 Y 为 $n \times n$ 维矩阵, V 和 I 都是 n 维矢量,和单个元件一样,整个系统的导纳阵 Y 也分为两部分

$$Y = Y_{ini} + Y_{add} \quad (4.4-94)$$

式中: Y_{ini} 是所有元件的固定导纳矩阵; Y_{add} 是所有元件的可变导纳矩阵。

因此,软件系统对整个系统的仿真可转化为求解节点方程 $YV = I$ 。实时仿真软件通常采用 LDU 分解来求解节点方程,如式 (4.4-95) 所示

$$Y = LDU \quad (4.4-95)$$

式中: L 为下三角矩阵; D 为对角阵; U 为上三角阵。即

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ L_{21} & 1 & 0 \\ L_{31} & L_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & U_{12} & U_{13} \\ 0 & 1 & U_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4-96)$$

当 Y 是对称阵时,有 $U = L^{-1}$ 。这样,仿真软件可以节省计算矩阵 U 的时间。

此时, $YV = I$ 可简化为

$$LDUV = I \quad (4.4-97)$$

分两步解此方程,首先,令 $J = DUV$, 则有

$$LJ = I \quad (4.4-98)$$

从此式求出 J ,然后再从 $J = DUV$ 中求出 V 。

其中,矩阵 L 、 D 、 U 由下式计算

$$D_{ii} = Y_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} D_{ik} L_{ik} U_{ki} \quad (4.4-99)$$

$$L_{ii} = U_{ii} = 1 \quad (4.4-100)$$

$$L_{ij} = \frac{(Y_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} D_{ik} L_{ik} U_{kj})}{D_{ii}} \quad (4.4-101)$$

$$U_{ij} = \frac{(Y_{ij} - \sum_{k=0}^{i-1} D_{ik} L_{ik} U_{kj})}{D_{ii}} \quad (4.4-102)$$

在任何步长内,只要导纳矩阵 Y 在前一个步长内改变了,那么,LDU 矩阵必须重新计算;如果既没有开关状态的改变,也没有非线性元件,那么,LDU 矩阵无需重新计算。

为了节省空间,矩阵 L 、 D 、 U 通常被存储在同一个矩阵 Y_{LDU} 中,表示为

$$Y_{LDU} = \begin{bmatrix} D_{11} & U_{12} & U_{13} \\ L_{21} & D_{22} & U_{23} \\ L_{31} & L_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \quad (4.4-103)$$

由于矩阵 Y 中通常包含大量 0 元素。为了避免在计算中使用这些 0 元素,可以定义一个矩阵 YF

$$YF_{ij} = 1 \quad \text{当 } Y_{ij} \neq 0 \text{ 时}$$

$$YF_{ij} = 0 \quad \text{当 } Y_{ij} = 0 \text{ 时}$$

5.2.3 三相同步发电机模型的开发

建立三相同步发电机模型的总的思路就是把发电机等效为电流源和导纳接口矩阵的形式。对于三相同步发电机来说,在仿真的每一步长内,都需要进行等效电流源的计算,但导纳接口矩阵是不变的。对等效电流源的计算,其实质就是利用自建模型环境编写求解微分方程的程序。首先要得到计算初值,可以认为电机的初始状态运行于稳态,此时,发电机以转速 $\omega_r = 1.0$ (标么值) 运行。因此,将其稳态参数代入方程即可计算出初值。其次,要确定端口约束条件。当我们在自建模型模块中定义了节点之后,这些节点都将被纳入系

统的节点方程进行计算, 自建模提供了接口函数以获得计算结果, 即各节点的电压, 因此, 端口约束条件也可以确定了。最后, 关键在于解微分方程所采用算法的收敛性。

建模流程图如图 4.4-15 所示。



图 4.4-15 程序流程图

5.3 船舶密集节点电力系统实时仿真的解耦处理方法

5.3.1 通用实时仿真软件在处理密集节点电力系统时的局限性

陆地电力系统中各电站是通过输电线路互联的, 信号在输电线路中的以光速传输, 此传输过程是有延迟的, 这种延迟随输电线路的长度而变化。如果系统仿真选取的仿真步长为 $50\mu\text{s}$, 因为光速 C 为 30 万 km/s , 因此, 信号在一个仿真步长内传输的距离 $L=C\times T=15\text{km}$ 。当仿真步长小于传输延迟时, 可以利用传输延迟完成数据通信, 此时将电力系统分属传输线两端的区域分由不同的处理器解算是可行的。也就是说对于各节点区域之间有较长传输线 (长度大于 15km) 的稀疏结构电力系统, 可以利用传输线实现真正意义上的物理解耦, 由不同的处理器单元同时处理不同的节点单元, 它们之间的数据交换在信号传输的过程中完成, 从而不会影响到实际运算结果的准确性。

对于船舶电力系统这样的密集节点电力系统, 其不同节点区域之间的传输线距离往往只有几十米, 最多不超过 200m 。因此船舶电力系统完全不具备稀疏特性, 通常运用传输线延时的做法将不再适用。

5.3.2 系统解耦的概念

对于密集节点电力系统, 可以采用在直流端或变化缓慢的信号处加入解耦元件的方式实现实时仿真。即将整个任务按照 CPU 单元的实时处理能力分解成若干子任务, 也就是将反映整个系统数学描述的大矩阵分割为若干小矩阵, 各小矩阵的运算由不同的 CPU 单元完成, 从而大大缩短了整个

系统的计算时间, 不同的 CPU 单元在一个步长内交换数据。需要指出的是, 某一个 CPU 单元接受的是其他 CPU 单元上一个仿真步长的数据, 但因为解耦选择在直流端或变化非常缓慢的信号端, 一个步长内, 其变化非常微小, 完全可以看作没有变化。因此, 这样的处理对系统运行结果影响极小。这一功能可以通过仿真系统的代码生成器实现。一般通用仿真系统的代码生成器可以用来分析网络拓扑, 分解线路、母线、控制元件及其子系统为不同的任务, 自动将任务合理分配给各并行处理器, 使各任务之间通信负担最小。代码生成器为每一任务生成 C 代码, 编译后可直接在运算服务器上实时运行。

值得注意的是, 解耦元件的位置是人为定义的, 因此, 解耦元件位置定义的正确与否直接影响到仿真结果的正确性。事实上, 在实际系统中, 所谓解耦元件就是放置在两模块间带或不带隔离元件的阻抗, 其模型如图 4.4-16 所示。

图 4.4-16 (a) 为不带隔离元件的解耦元件模型, 图 4.4-16 (b) 为带隔离元件的解耦元件模型。从数学模型的角度上理解, 解耦元件就是方程组。将一个系统分解为几个模块后, 各模块间并非相互独立的, 而是存在一定的耦合关系, 解耦元件是指反映这种耦合关系的方程组。

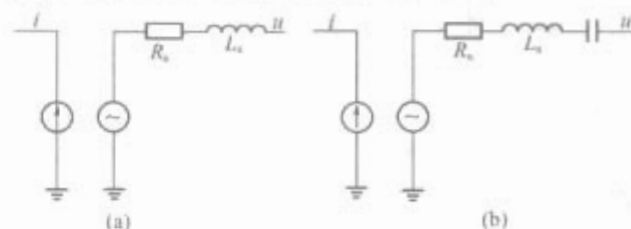


图 4.4-16 解耦元件模型

(a) 不带隔离元件; (b) 带隔离元件

5.4 实时仿真系统与外部设备的接口关系

实时仿真系统具备进行继电保护装置、安全自动装置以及测量与控制装置实时测试的功能。对于此功能, 比较初级的做法是利用仿真软件将仿真结果事先存储下来, 然后通过信号转换器和功率放大器将信号送入待测设备进行回放测试。该方法本质上是一种开环测试的做法, 由于开环测试过程中被测装置的响应信号无法实时反馈回计算机, 从而观察不到动态交互的效果, 无法进行自动重合闸装置的测试, 无法研究几个自动装置在系统中相互影响、共同作用于系统的情况。

实时仿真系统通过高速通信系统与信号转换及输入输出系统同外部设备相连, 可以实时反映被测系统相关信号的变化, 特别适合于表征多级保护系统之间的内在逻辑关系, 其相对于开环测试系统的优势是显而易见的。实时仿真系统对装置进行实时闭环测试的原理如图 4.4-17 所示。

借助该功能, 实时仿真系统可以方便地实现评估保护系统的功能实现以及验证系统设备安装等功能。



图 4.4-17 实时仿真系统进行实时闭环测试原理示意图

参 考 文 献

- [1] 孙诗南. 舰船电力系统的设计. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [2] 黄伦昆, 朱正鹏, 刘宗德. 船舶电站及其自动装置. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [3] GJB13A-97 舰船电气规范. 1997. 12.
- [4] 吴励坚. 大电流母线的理论基础与设计. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [5] 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [6] 范锡普. 发电厂电气部分. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [7] 沈兵. 矩形母线短路动稳定校验的研究. 低压电器, 2004, 12.
- [8] 王锡凡. 现代电力系统分析. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 吴旭生. 双绕组交直流发电机参数研究. 海军工程大学博士学位论文, 2003.
- [10] 张汝均. 船舶电站同步发电机的自动励磁装置. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [11] 陈衍. 电力系统稳态分析. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [12] 李麟, 沈兵, 庄劲武. 船舶电力系统. 武汉: 海军工程大学出版社, 2003.
- [13] 沈兵, 李麟, 庄劲武, 徐正喜. 船舶电站自动化. 武汉: 海军工程大学出版社, 2004.
- [14] H. W. Dommel. 电力系统电磁暂态计算理论. 李永庄、林集明、曾昭华译. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [15] 何仰赞. 电力系统分析(上)、(下). 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [16] 马伟明. 十二相同步发电机突然不对称短路的分析. 清华大学学报(自然科学版), 1996.
- [17] 李光琦. 电力系统暂态分析. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [18] 王焕文. 船舶电力系统及自动装置. 北京: 科学出版社, 2004.
- [19] 廖瑛、梁加红、姚新宇等. 实时仿真理论与支持技术. 北京: 国防科技大学出版社, 2002.
- [20] IEC-Publ. 865/1993, "Short-circuit currents-Calculation of effects. Part 1: Definitions and Calculation methods". Geneve /Suisse; Bureau Central de la CEI
- [21] Palczynska B., Tarasuk T. A measurement method of voltage properties on main switchboard busbars-tools and preliminary results. Polish Maritime Research, Vol. 7, No 2, 2000, pp. 8-11
- [22] Reineche H., Schild W. Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation. Proceedings of IMECE'91 Conference, Shanghai, China 1991, pp. 1-10
- [23] Mindykowski J. *Assessment of Electric Power Quality in Ship System Fitted with Converter Subsystem*. Gdansk; Press of Shipbuilding and Shipping Ltd, 2003
- [24] Arrilaga J, Wattson N. R, Chen S. Power System Quality Assessment. John Wiley and Sons, UK 2000
- [25] Dugan R. C, McGranaghan M. F, Beaty H. W. Electrical power system quality, McGraw Hill, New York 1996
- [26] Greenwood A. Electrical transients in power systems. Wiley Interscience, USA 1971
- [27] Arrilaga J, Bradley D, Bodger P. S. Power System Harmonics. John Wiley and Sons, London 1985
- [28] Arrilaga J, Smith B. C, Watson N. R, Wood A. R. Power System Harmonic Analysis. John Willey and Sons, London 1997
- [29] Goldberg G. Power Quality. Fourteenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Wroclaw 1998
- [30] Zwicky R. Sources of distortions and their influence on the supply. Measurement 9 (1), 1991, 28-37
- [31] Cristaldi L, Ferrero A. A method and related digital instrument for the measurement of the electric power quality. IEEE Trans. on Power Delivery 1995, 10 (3), 1183-1189
- [32] Hart D. G, Peterson W, Uy D, Schneider J, Novosel D, Wright R. Tapping protective relays for power quality information. IEEE Computer Applications in Power, January 2000, 45-49
- [33] Utility Power Quality, Dranetz Technologies, Inc., July 1988
- [34] Robert A, Marquet J. Assessing voltage quality with relation to harmonics, flicker and unbalance on behalf of CIGRE Working Group 36.05, "Voltage Quality" Paris 1992
- [35] Draft IEC 61 000-2-12, "Electromagnetic Compatibility. Part2: Environment. Section 12: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium voltage power supply systems", Committee Draft 77A/266/CD, Geneve, April 1999
- [36] Draft IEC 61 000-3-4, "Electromagnetic Compatibility. Part3: Limits. Section 4: Limits for harmonic current emissions. (Equipment with input current > 16A per phase)", Committee Draft 77A/169/CDV, Geneve, April 1997
- [37] Draft IEC 61 000-3-6, "Electromagnetic Compatibility. Part3: Limits. Section 6: Limitation of emission of harmonic currents for equipments connected to medium and high voltage power supply systems", Committee Draft 77A/135/CDV, Geneve, July 1995
- [38] IEC 1000-2-4, Part2, Environment, Section 4. LF-conducted; Environment-compatibility levels industrial plants for low frequency conducted disturbances, 1994
- [39] IEC 61000-2-1(1990), "Electromagnetic compatibility part 2: Environment Section 1: Description of the environment-Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems", Geneve 1990
- [40] IEC 61000-2-2 (1990), "Electromagnetic compatibility part 2: Environment Section 2: Compatibility levels

- for low frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems", Geneve 1990
- [41] IEC 61000-2-4 (1994), "Electromagnetic compatibility part 2: Environment Section 4: Compatibility levels in industrial plants for low frequency conducted disturbances", Geneve 1994
- [42] IEC 61000-2-6 (1995), "Electromagnetic compatibility part 2: Environment Section 6: Guide to the assessment of the emission levels in the power supply of industrial plants as regards the low-frequency conducted disturbances", Geneve 1995
- [43] IEC 61000-3-2 (1995), "Electromagnetic compatibility part 3: Limits. Section 2: Limits for harmonic current emissions. (Equipment with input current $<16\text{A}$ per phase)", Geneve, 1995, and consolidated edition 1998
- [44] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard 1159-1995
- [45] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE, New York 1993
- [46] Przepisy IACS, Testing procedure for electrical, control and instrumentation equipment, computers and peripherals covered by classification, E 10/July 1999
- [47] Polish Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Sea-going Ships. Vol. 8, Gdansk, 1995
- [48] Mindykowski J. Electrical power quality measures and their application in marine engineering. Proceedings of IMECE 2000, Shanghai 2000, 28-36
- [49] Mindykowski J, Tarasiuk T. Methods and appropriate instrumentation for estimation of electrical energy quality. Measurement-Journal of IMEKO, Elsevier 1998, 23(3): 195-203
- [50] Mindykowski J, Tarasiuk T. Quality factors of electrical power and their measurements under ship's conditions. XIV IMEKO World Congress, Tampere, Finland 1997, Vol. IVb, 19-24
- [51] Tarasiuk T, Mindykowski J. Electrical energy quality under ship's conditions. XVI IMEKO World Congress, Vienna 2000, Proceedings Vol. VII, 245-250
- [52] Bucci G, Germano A, Landi C. Real-time harmonics estimation on power system by means of a transporter-based measurement apparatus. Proc. XIII IMEKO World Congress, Torino, Italy 1994, 1276-1281
- [53] Key T. S. Diagnosing Power Quality-related computer problems. IEEE Transactions on Industry Applications, July/August 1979, Vol. 1A-15, No 4
- [54] Mindykowski J, Tarasiuk T. Specialized analyzer for electrical energy quality estimation in ship electrical power system. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, St. Paul, Minnesota, USA 1998, 791-796
- [55] Ward D. J, Burke J. J, Griffith D. C. Power Quality-two different perspectives. IEEE Transactions on Power Delivery, July 1990, 5(3): 1501-1513
- [56] AC Power Line Harmonic Analyzer NOWA-1, Wandel and Golterman, Katalog 1989
- [57] Arrilaga J, Watson N. R, Chen S. Power System Quality Assessment. John Wiley and Sons, 2000
- [58] Bucci G, Germano A, Landi C. Real-time harmonics estimation on power system by means of a transporter-based measurement apparatus. Proc. XIII IMEKO World Congress, Torino, Italy 1994, pp. 1276-1281
- [59] Bucci G, Landi C. On-line digital measurement for the quality analysis of power systems under nonsinusoidal conditions. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, August 1999, 48(4): 853-857
- [60] Bucci G, Landi C. On-line digital measurement for the quality analysis of power systems under nonsinusoidal conditions. IEEE Instrumentation and Measurements Technology Conference, Brussels, Belgium 1996, 934-938
- [61] Carbone P, Petri D. Average power estimation under nonsinusoidal conditions. IEEE Transactions and Measurement, April 2000, 49(2): 333-336
- [62] Cristaldi L, Ferrero A. A method and related digital instrument for the measurement of the electric power quality. IEEE Trans. Power Del. 10(3), 1995, 1183-1189
- [63] Dugan R, Mc Granagham M, Beaty H. Electrical Power System Quality. McGraw-Hill Companies, 1996
- [64] Ferrero A, Manchetti A, Sasdelli R. The measurements of electric quality indices in search of the most accurate approach. Proceedings of the 7th IMEKO International Symposium on Modern Electrical and Magnetic Measurement, Prague, Czech Republic 1995, Part I, 48-52
- [65] Reinecke H, Schild W. Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation. IMECE'91 China, 1-10
- [66] Mindykowski J, Tarasiuk T. New method of electrical energy quality estimation on ship electrical power system, IMEKO-TC 4 Symposium on Development in Digital Measuring Instrumentation, Naples, Italy 1998, 129-134
- [67] Mindykowski J, Tarasiuk T. Problems of electrical energy quality estimation on ship electrical power system, IMTC'99, IEEE Conference, Venice, Italy 1999, Vol. 1, 225-230
- [68] Arrilaga J, Watson N. R, Chen S. Power System Quality Assessment. John Wiley and Sons, 2000
- [69] Peretto L, Sasdelli R, Serra G. Measurement of Harmonics Losses in Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Current. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, April 2000, 49(2): 315-319
- [70] Sydenham P. H. Handbook of measurement science. Vol. 1 i 2, Wiley and Sons, 1982 and 1983
- [71] Mienski R, Pawelek R, Wasiak I. On the needs to control power quality in polish electrical networks. Electrical Power Quality and Utilization, 5(2): Sep-

- tember 1999, 21-26
- [72] Reinecke H, Schild W. Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation. Proceedings of the IMECE'91, Shanghai 1991, 1-10
- [73] Angrisani L, Daponte P, D'Apuzzo M, Testa A. A measurement method based on the wavelet transform for power quality analysis. Transactions on Power Systems, IEEE, January 1998
- [74] Angrisani L, Daponte P, D'Apuzzo M, Testa A. A new wavelet transform based procedure for electrical power quality analysis. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference On Harmonics and Quality of Power, Las Vegas, USA, October 16-18 1996, 608-614
- [75] Arrillaga J, Watson N. R, Chen S. Power system quality assessment. John Wiley & Sons Ltd, 2000
- [76] Blair J. J. A method for characterizing waveform recorder errors using the power spectral distribution. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, October 1992, 41(5): 604-610
- [77] Daubechies I. Ortonormal bases of compactly supported Wavelets. Comm. Pure and Applied Mathematics, 1988, Vol. 16, 909-996
- [78] Dugan R, McGranaghan M, Beaty H. Electrical power systems quality. McGraw-Hill Companies, 1996
- [79] Galli A. W, Nielsen O. M. Wavelet analysis for power system transients. IEEE Computer Applications in Power, January 1999, 16-25
- [80] Harris F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier Transform. Proceedings of the IEEE, 66(1): January 1978
- [81] Mallat S. G. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. IEEE Trans. Pattern Anal. And Maschine Intell. , 1989, 11(7): 674-693
- [82] Mallat S. G. Multiresolution approximation and wavelet ortonormal bases of $L^2(R)$. Trans. American Mathematical Soc. , 1989, 315(1): 69-87
- [83] Oppenheim A. V, Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing, Englewood Cliffs, New York, Prentice-Hall 1989
- [84] Polikar R. The Wavelet Tutorial, part I, Fundamentals: The Fourier Transform and the Short Time Fourier Transform, 1999
- [85] Ribeiro P. F. Wavelet transform: an advanced tool for analyzing non-stationary harmonic distortions in power systems. Proceedings of the IEEE ICHPS VI, Bologna, Italy 21-23 September 1994, 365-369
- [86] Santoso S, Powers E. J, Grady W. M. Power quality disturbance identification using wavelet transforms and artificial neural networks. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Harmonics and quality of power, Las Vegas, NV, USA October 16-18 1996, 615-618
- [87] Tunaboylu N. S, Collins E. R. The wavelet transform approach to detect and quantify voltage sags, Proceedings of the 1996 IEEE International Conference On Harmonics and Quality of Power, Las Vegas, NV, USA October 16-18 1996, 619-624
- [88] Vetterli M. Wavelets and filter banks: Theory and design. Trans. Sigantl Processing, 1992, 40(9): 2207-2232
- [89] Weon-Ki Yoon, Devaney M. Power Measurement Using the Wavelet Transform. Proceedings of the IEEE IMTC Conference, USA May 1998, 801-806
- [90] Weon-Ki Yoon, Michael J. Devaney. Reactive Power Measurement Using the Wavelet Transform. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, April 2000, 49(2): 246-252
- [91] Chui C. K. An introduction to wavelets. Academic Press, San Diego, 1992
- [92] Bucci G, De Capua C, Landi C. Power measurements on high distorted signals, experimental comparison between two alternative developed device solutions. Measurement, Elsevier, No 23 (1998), 151-518
- [93] Kusmerek Z, Korczynski M. J. Instrumentation for measuring the asymmetrical power in 3-phase net. Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, St. Paul, Minnesota, USA 1998, 816-819
- [94] Weiler J. Nonsinusoidal conditions and power quality. Is there a common denominator? IMEKO TC-4 ISDD-MI'98, Naples 1998, 47-53
- [95] Midnykowski J, Masnicki R. New approach to active electrical quantity measurements in ship power engineering systems. Proceedings of the IEEE Conference Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels 1996, 132-136
- [96] Mindykowski J. New approach to measurements on ships facing development of marine electrotechnology. Proc. International Marine Electrotechnology Conference and Exhibition (IMECE'2000), Shanghai 2000, pp. 1-17
- [97] Review of emergence source of electrical power. IMO document DE 39/6, Sub-committee on Ship Design and Equipment, London, October 1995
- [98] Mindykowski J, Tarasiuk T. Quality factors of electrical power and their measurements under ships conditions. XIV IMEKO World Congress, Tampere 1997, Vol. IVb, 19-24
- [99] Mindykowski J, Tarasiuk T. The influence of electrical energy quality on econnmical exploitation of ship technical system. 4th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, EPQU'97, Cracow 1997, 329-334
- [100] Bucci G, landi C, Ometto A. An active filter for harmonics suppression on power systems. Proc. Alternative Current Electrical Drives (ACED)'95, Ekaterinburg, Russia 1995, 63-66
- [101] Frackowiak L, Muszynski R, Strzelecki R. The generalized optimization critertion for fliters. Proc. 7th

- European conference on power Electronics and Applications EPE'97, Trondheim, Norway 1997, Vol. 1, 4798-4803
- [102] Sheperd W, Zand P. Energy flow and power factor in nonsinusoidal circuits. Cambridge Univ. Press, 1979
- [103] Akagi H., Kanazawa Y., Fujita K., Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power and its application. Technological university of Nagaoka, paper No. 58-B60, vol. 103, No. 7, pp 483-490, 1985. 7.
- [104] Malesani L, Rosseto L, Tenti P. Active filter for reactive power and harmonic compensation. Conf. Rec. 17th Annual Meeting IEEE Power Electrical Council, Vancouver 1986, 321-330
- [105] Peng F. Z, Akagi H, Nabae A. A study of active power filters using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation. IEEE Transactions on Industrial Application, 1986, 22 (3): 460-465
- [106] Barabosa P. G, Watanabe E. H. Advanced series reactive power compensator based on voltage source inverters. Conf. Proc. COBEC'95, San Paulo 1995, 345-354
- [107] Bhavaraju V. V, Enjeti P. N. An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system. IEEE Transaction on Industrial Applications, 1996, 32(2): 287-292
- [108] Nabae A, Yamaguchi M. Suppression of flicker in power system. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1995, 31(1): 107-111
- [109] Konwencja SOLAS, SOLAS Consolidated Edition 1997, International Maritime Organization, London 1997
- [110] Reinecke H, Schild W. Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation. Proceedings of International Marine Electrotechnology Conference and Exhibition IMECE'91, Shanghai 1991, 1-10
- [111] Majewski J, Mindykowski J, Masnicki R. Electronic two-system frequency meter. Joint Proceedings WSM Gdynia-Hochschule Bremerhaven, 1987, No 2, 17-83
- [112] Mindykowski J. Optoelectronic converters in marine use. Measurement-Journal of IMEKO, Elsevier, 1993, 2(2): 135-158
- [113] Sydenham P. H. Handbook of measurement science, T. 1 and 2, Wiley and Sons, 1982 and 1983
- [114] Filipski P. S, Arseneau R. Definition and Measurement of apparent power under distorted Waveform conditions. Proceedings of the Third International Conference on Harmonics in Power Systems, 1987, 127-131
- [115] Reinecke H, Schild W. Harmonics in main electric supply systems with semiconductor rectifiers and subsequent methods of compensation. Proceedings IMECE'91, Shanghai 1991, 1-10
- [116] Przepisy IACS, Testing procedure for electrical, control and instrumentation equipment, computers and peripherals covered by classification, E10/July 1999
- [117] Dokument IEC 945, Geneve 1996
- [118] Mindykowski J, Pajorek D, peplinski H. On select the control-measuring instruments for ship power plants in compliances with the requirements of classification societies. Polish Maritime Research, March 1998, 18-22





第5篇 船舶电力推进

主编单位：中国船舶重工集团公司第七一二研究所
海军工程大学

主 编：周 平 张启平 任修明 张晓锋 李槐树

编写人员：周 平(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
张启平(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
任修明(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
张晓锋(海军工程大学)
李槐树(海军工程大学)
朱芸生(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
谌 谨(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
解锦辉(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
杨德望(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
董宏宪(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
李明勇(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
唐绍栋(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
王坚强(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
俞欢军(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
黄仁和(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
黎 波(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
丁望来(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
黄 华(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
唐文彬(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)
沈建清(海军工程大学)
乔鸣忠(海军工程大学)
于 飞(海军工程大学)
让余奇(海军工程大学)

第1章 概述

船舶电力推进就是由电动机带动船舶推进器,而不是由原动机直接带动推进器。这是电力推进区别于直接推进的主要区别。

与一般船舶机械拖动不同,电力推进电动机的功率很大,一般从几百千瓦到几十兆瓦。推进电机的功率几乎与发电机组总容量相当,因而电力推进的设计不仅是推进电动机部分,而是要包括发电机方面在内的整个系统。

本篇将以叙述这一特殊性为主,主要介绍船舶电力推进的基本原理,包括螺旋桨对推进系统特性的要求与相互间的配合、电力推进系统的基本工作状态、电力推进系统的主要参数计算等。同时也介绍了船舶推进电机的特点和设计方法、船舶电力推进系统的动态特性和计算方法、采用大功率电力电子器件的电力推进的变流与调速、船舶电力推进的监测与控制等,并尽量结合我国自行设计、建造的电力推进船舶进行叙述。

1 船舶电力推进技术发展综述

1.1 电力推进发展简史

船舶电力推进并非新名词,这一术语出现于1838年,迄今已有170余年的历史。船舶电力推进的发展随船舶航运事业的发展和电气、电力电子技术的不断进步而发展。在20世纪初期,交流和直流电力推进系统即已在船舶中应用。回顾电力推进的发展,大致有以下几个阶段。

1.1.1 试验时期

这个时期大约从电动船诞生到20世纪初。电力推进大多采用蓄电池作动力,用直流电动机作推进电机,功率在75kW以下。

1.1.2 广泛应用时期

20世纪20~30年代,尽管大功率蒸汽轮机作为舰船原动机的技术已经成熟,但由于机械加工水平和能力的不足,从民用货轮、客轮及油轮到航空母舰等大功率舰船,多采用电力推进。电力推进出现过广泛应用的流行期,除潜艇、破冰船等特殊工程专用舰船外,仅美国就有226艘护卫舰与488艘民船采用电力推进。美国建造的“新墨西哥”号电力推进战列舰,采用汽轮机发电,异步电动机推进的总轴功率已达到4000~22000kW。

1.1.3 充分应用电力推进特长期

20世纪40年代后期,由于机械加工技术的进步,特别是齿轮传动装置加工能力的提高,蒸汽透平和柴油机朝大型化发展,批量生产能力得到了提高,而当时的电力推进却由于技术条件的限制,其装置大而笨重、效率低、成本高,限制了其广泛应用。因此大部分水面舰船均采用蒸汽轮机、柴油机和燃气轮机及各种联合动力装置机械推进。

20世纪50年代,电力推进主要是可调速的“发电机—电动机”直流系统,调速利用电机励磁回路的可变电阻来实现。

20世纪60年代,半导体技术可以保证由晶闸管系统来控制励磁,推进了电力推进系统的发展。20世纪60年代中

期,出现了带变距桨的交流电力推进。

20世纪70年代,电力推进的特征是借助大电流的半导体元器件,将用于船舶总电网工作的三相交流发电机电流传给电力推进装置,但是,直流船舶推进电动机有换向器和电刷,在使用中存在许多诸如大负载和反转时出现火花换向器磨损、电刷烧毁、产生电磁干扰,维护难等缺点。当时可获得的交流推进装置不能提供必要的容量,且变频当时还是新鲜事物,交流换向器电动机包含有与直流变速系统相同的缺点。

1.1.4 蓬勃发展时期

20世纪80年代以后,通过改变供给电动机的电流频率和电压来调节推进电动机转速的交流推进系统取代了直流推进系统,借助于逆变器和变频器来实现的各种方案得到广泛应用。采用更紧凑和更轻便的交流推进电动机—同步电动机和异步电动机可以使系统获得更高频率,大大简化设备的维护。采用现代交流变换器技术的以下两个系统已获得广泛应用:

(1) 带直接变频器和安静型同步推进电动机的系统,用于功率为1~40MW。

(2) 带具有中间直流环节的变频器和异步推进电动机的系统;电动机转速范围为800~1500r/min,并具有与推进轴连接的减速传动装置,这种类型的推进装置适合于7~8MW功率使用。

20世纪后期,功率电子器件制造技术不断提高、自控技术不断完善、能源的综合应用,大大地推动了商用船舶电力推进系统技术的应用水平,更大地提升了电力推进系统的有效功率等级,电力推进民船出现了前所未有的发展,电力商船的应用范围日益扩大。结构上从燃气轮机、柴油机或核动力等其他单机配制到诸多种原动机混合配制;功率等级上从百千瓦级到数十兆瓦级不等;推进模式上更加多样化,如用途广泛的吊舱式推进;由于采用了脉宽调制和循环变频等控制技术,推进电机控制更加可靠;船上的用电品质得到充分考虑。

21世纪以来,电力推进船舶的设计主要有两大变化:

(1) 设备。

1) 元器件方面,涉及高功率密度静态开关设备及多兆瓦调速装置的发展。

2) 电动机方面,在加紧研究应用超导同步电动机、单极电动机、永磁电动机、同步电动机、异步电动机等。

3) 吊舱装置,民船最近的趋势是采用吊舱,目前有5大公司制造吊舱,功率从几百千瓦到25MW左右。海军也开始效仿。

4) 发电机,同步无刷励磁。

5) 调速控制方面,直接变频器、间接变频器、PWM、矩阵变换器、连续放电整形(SDR)变换器、LCI、IGBT、IGCT、GTO等器件和装置的发展迅猛。

(2) 综合结构。大力采用综合电力推进,即将推进系统和船上用电系统综合到单个电力系统中。

目前综合电力推进在民船领域已普及,近年的客轮、穿

梭油轮、产品运输轮、渡轮、破冰船、海岸石油开发平台等都装有综合电力推进系统。海军也在发展综合电力推进两栖战舰和军辅船。美国、英国、法国、荷兰和其他国家的海军都在发展全电力战舰。

1.2 电力推进的优点

与直接或带齿轮推进相比，电力推进的主要优点有：

(1) 安装灵活性。原动机不必紧靠螺旋桨轴系。可以通过从稳定性、可接近性以及其它考虑获得最佳组合来确定原动机的台数、大小和布置。

(2) 易于获得理想的特性。在低速、起动停车、恒功率、恒电流、堵转等特性方面是常规推进无法比拟的。

(3) 运行可靠性。可使用多台发电机组和电动机。从而确保较大的可靠性，因为丧失一台装置不致引起电力的全部丧失。同时，进行多台小容量装置的维修比进行单台大容量装置的维修更高效、更容易。

(4) 容易操作。对于电力推进装置，可将控制功能减少到少数简单操作，而且在需要时，能够方便地实施远程控制。

(5) 减小振动。较少的螺旋桨振动传递到原动机上。

(6) 适用性。除提供推进电力外，还可利用发电机组给其他日用负载供电。

(7) 燃料经济性。由于可以完全关闭一些发电装置，且另一些发电装置在接近满载和高效率下运行，因此在减小了功率时燃料的经济性是极好的。通过使用固态变换器控制电动机转速，发电机在其最佳转速下运行，使原动机获得最高效率。

1.3 电力推进的局限性

与直接或带齿轮推进相比，电力推进的主要局限性有：

(1) 电力推进装置的质量较大、价格较高，且通常占用较多的空间。

(2) 在最高速度时的总效率通常较低。

(3) 采用电气设备可能引来一些需要防范的附加危害，如电气设备中可能的火灾、水引起的扰乱（闪络、短路和接地）、电击造成的人身伤害等。

(4) 电力推进装置需要受过较好训练且具有较高技能的操作人员。

(5) 需要种类繁多的备件。

(6) 需要增加维护量。

2 船舶电力推进系统的构成与分类

2.1 电力推进系统的构成

船舶电力推进系统一般由螺旋桨、电动机、发电机、原动机以及控制调节设备组成。其构成图见图 5.1-1。

其中，原动机 Y 的机械能经发电机 G 变为电能，传输

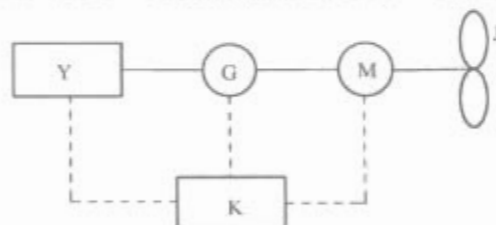


图 5.1-1 电力推进系统构成简图
Y—原动机；G—发电机；M—推进电机；
K—控制设备；J—螺旋桨

给推进电动机 M，由电动机将电能变为机械能，传递给螺旋桨 J，推动船舶运动。由于螺旋桨所需功率很大，推进电动机不能由一般的日用电网供电，必须设置单独发电机或更大功率的电源。因此电力推进船可设立两个独立的电站，也可设立一个综合性电站。

电力推进用的原动机可以采用柴油机、汽轮机或燃气轮机。目前一般采用高速或中高速柴油机，大功率时采用汽轮机或燃气轮机。

发电机可以采用直流他励、交流同步或交流整流发电机。

电动机可以采用直流他励电动机、交流同步电动机、异步电动机或永磁电动机。

船舶推进器一般采用定距螺旋桨，因为其效率高，尺寸较小。

现代船舶电力推进的核心是综合电力推进技术，综合电力推进系统包括发电、输电、配电、电能变换以及电力推进等内容。其构成图见图 5.1-2。

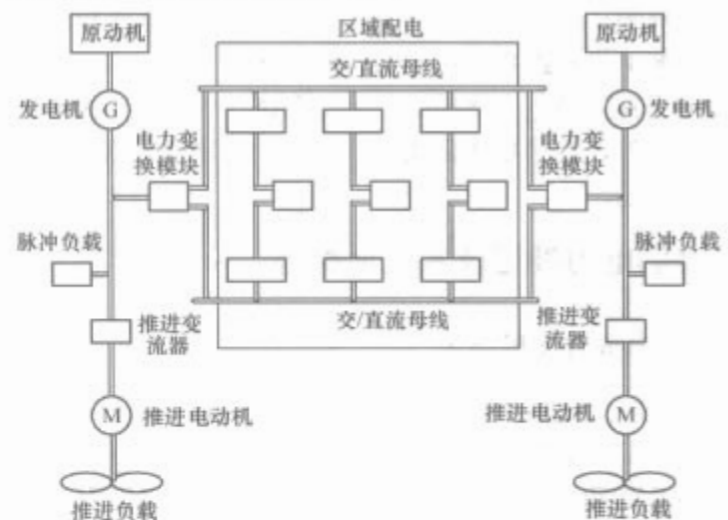


图 5.1-2 综合电力推进系统构成简图

综合电力推进系统是船舶动力和船舶电力的有效综合，而非简单地组合。由此，系统可以对全船的能源进行统一管理、综合利用、有效分配。在这种设计模式下，推进电动机实际上变成了船上电网之中的一个“普通”电力用户，它们通过电力系统，将原动机和推进系统有机地结合在一起。

2.2 电力推进系统的分类

电力推进装置利用旋转电机从原动机向螺旋桨传递功率。由原动机驱动的发电机直接或通过固态整流器或变频器供电给推进电动机，推进电动机直接或通过减速齿轮装置与螺旋桨联轴。由于使用了固态变换器，所发出的供推进电动机使用的电力不必是同一类型，可以是交流电也可以是直流电。因此，船舶电力推进系统可以根据所用的原动机形式、主电路电流种类以及装置的功能进行分类。

2.2.1 按原动机类型分类

2.2.1.1 柴油机电力推进

柴油机是目前船舶电力推进中最广泛采用的原动机，特别是中、小型船舶，采用柴油机较汽轮机更为经济。为了减轻质量和减小体积，电力推进一般采用高、中速柴油发电机组。

2.2.1.2 蒸汽轮机电力推进

一般适用于大功率电力推进以及船上本身需要大量蒸汽消耗的船舶。汽轮机可以用低级廉价的燃料，降低船舶营运的成本。汽轮机的缺点是需要蒸汽锅炉，使动力装置占用面积大，质量亦大。

2.2.1.3 燃气轮机电力推进

燃气轮机功率大、体积小、质量轻、结构简单、启动快，是电力推进可考虑的原动机。

2.2.1.4 原子能反应堆装置电力推进

把原子能反应堆中产生的热能，通过热交换器，加热蒸汽或惰性气体，然后通过汽轮机发电。作为船舶电力推进，它可以不需燃料储备而航行很长时间，因而特别适于破冰船、潜艇、远洋船等大中型船舶。

2.2.1.5 燃料电池电力推进

燃料电池是直接或间接地使用燃料氧化自由能的化学电池，它与通常的电池不同，只要连续供应燃料就能连续产生电能。此外，它工作可靠、无噪声，并可根据需要，任意串、并联。这些优点，使燃料电池在电力推进的应用中具有广阔的发展远景。

2.2.2 按电流种类分类

按电流种类可分成直流、交流、交直流系统电力推进和直交流系统电力推进。

(1) 直流电力推进。又分为调压电力推进、简单 G-M 电力推进、恒功率电力推进以及恒电流电力推进。

(2) 交流电力推进。又分为同步电动机方式、感应电动机方式以及无换向器电动机方式。

(3) 交直流系统电力推进。交直流系统是采用电力电子技术把交流电源和直流电动机结合成一个系统。

(4) 直交流系统电力推进。直交流系统是采用电力电子技术把直流电源和交流电动机结合成一个系统。

2.2.3 按推进功能分类

2.2.3.1 独立电力推进

螺旋桨专由推进电动机带动，主发电机除供电给推进电动机外，有时尚可把一部分电能供给船舶电网。

2.2.3.2 联合电力推进

联合电力推进方式如图 5.1-3 所示，它可以有四种工况：

(1) 螺旋桨由推进电动机带动（此时主机与螺旋桨脱开），作低速航行。

(2) 螺旋桨由主机带动（此时推进电动机与螺旋桨脱开）。

(3) 螺旋桨由主机与推进电动机共同带动，作高速航行。

(4) 在航行时推进电动机由主轴带动，作发电运行，把电能回馈给电网（相当于轴带发电机）。

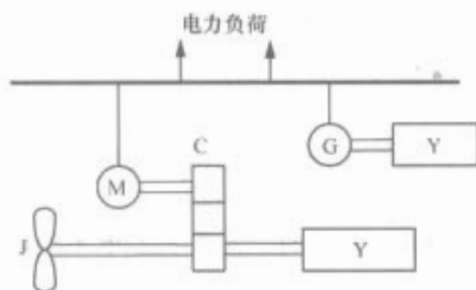


图 5.1-3 联合电力推进

Y—原动机；G—发电机；M—推进电机；

J—螺旋桨；C—齿轮箱

2.2.3.3 特种电力推进

特种电力推进有侧推电力推进、全回转吊舱电力推进、超导电力推进、磁流体电力推进和泵喷电力推进等。

2.2.3.4 综合电力推进

综合电力推进对全船的能源进行统一管理，综合利用、

有效分配。

3 船舶电力推进对设备的要求

用于电力推进的电机和开关设备容量很大，目前还没有系列产品可供选用，往往是根据具体产品进行试制的。为此，在下面列出一些对电力推进装置的一般要求。在进行具体船舶电力推进设计或签订产品试制技术条件时，还需视情况提出具体要求。

3.1 电力推进设计一般步骤及内容

3.1.1 电力推进方案确定

这时应与总体、轮机专业密切配合，根据总体性能要求与其他动力装置方案作辩证的分析。一条船采用电力推进总是利用了电力推进的某些优点（如工作性质和工作状况的要求、原动机选型方面的要求以及总体布置、船体结构方面的要求等），而迁就了某些缺点（如机组多、系统控制复杂等）。

3.1.2 主电路参数确定

根据总体方案及螺旋桨参数（特性曲线与效率曲线）选定发电机组和推进电动机的功率、转速和电压。电机各主要参数、外形尺寸及质量等数据由电机制造部门提供。

3.1.3 拟制主电路和控制线路草图，编制主要设备订货清单

以上三步是在方案设计及技术设计时完成，供有关各方面共同审查比较。在确定电力推进方案后，根据审查意见进行施工设计。

3.1.4 电力推进设计的内容

电力推进设计一般包括下列内容：

- (1) 电力推进说明书。
- (2) 主电路原理图——包括主电路的各种转换方式。
- (3) 控制原理图——包括各种操纵及自动控制系统、保护和信号指示等。
- (4) 主配电板原理图、布置图及结构图。
- (5) 电力推进操纵台布置图、内部接线图及结构图等。
- (6) 电力推进控制板布置图、内部接线图等。
- (7) 其他电力推进设备的布置图、内部接线图及结构图等。
- (8) 电力推进装置外部接线图。
- (9) 电力推进装置设备订货清单及特种设备订货技术要求。

以上图纸及深度按具体需要绘制。

3.2 电力推进一般要求

在构成电力推进系统之前，应弄清螺旋桨对系统的要求。

3.2.1 转矩要求

(1) 推进电动机应具有足够的正常转矩，以能在船舶最大航速航行情况下机动操纵和在合理的时间内使船舶启动、停止或后退。交流推进系统应有足够的转矩余量，以便能在恶劣天气下航行或多螺旋桨船舶转向情况下，电机不致失步。

(2) 推进电动机应具有克服起步转矩及摩擦转矩的足够能力。起步转矩及摩擦转矩主要是由艏轴管的摩擦引起的，它依赖于旋转部分的质量、尺寸、轴承的数量、润滑油的黏度以及轴处于静止的时间长度。起步转矩是变化的，通常是全负载转矩的 5%~15%。对于潜艇，这个百

分数比较高,这是因为下潜压力在轴上引起的推力轴承摩擦力的增加。

(3) 推进设备必须有足够的储备转矩和功率容量以吸收强加的波动负载。当船在风浪中发生纵摇和侧摇时,推进螺旋桨的功率和转矩随着其浸入的深度而变化。

(4) 推进设备应有良好的倒车与操纵性能。对于每一艘船和螺旋桨,其转矩依赖于船的速度和螺旋桨的转速。一般地,船的加速度和减速度由加在推进轴上的转矩和轴的强度所限制。

3.2.2 转速要求

(1) 在整个转速范围内,包括最低速以及两个旋转方向,推进电动机、齿轮和轴系的轴承均应保持有效的润滑。在规定的油温下,不应导致上述轴和轴承损坏。

(2) 当一艘双螺旋桨船在转速设定值不变的情况下旋回一转时,旋回圈内舷侧螺旋桨所要求的转矩增加,而旋回圈外舷侧螺旋桨所要求的转矩降低,如果两个螺旋桨保持同样转速,推进控制系统的设计必须能适应这个差异。

(3) 推进电动机带动推进器运行时,每次正转至反转(或反之)转换所需的时间和每次转换时舰艇继续保持原航向航行的距离应尽量短,并与总体要求相适应。对交流电机,在转换期间各部分的发热不应超过安全温度,转换时不应由于冲击转矩而造成损坏。

(4) 在任何正常工作转速下,原动机、发电机、电动机、轴系和螺旋桨均不应有有害的扭转振动和交流系统的电振荡。

(5) 电力推进系统应保证每根推进轴的电气设备具有独立性,当一根推进轴的电气设备不能正常运行时,不应影响到其他任何推进轴的电气设备的运行。

3.2.3 制动要求

3.2.3.1 推进电动机的再生电力

当船舶突然改变方向,从正车到倒车或反过来时,船舶的动量继续驱动水经过螺旋桨,引起电动机不再给螺旋桨提供转矩,螺旋桨仍然继续旋转,电动机的转子在外力作用下,引起电动机发电。

3.2.3.2 推进电动机的能耗制动

电力推进有两种方式进行制动,第一种方式为能耗制动。是将电动机与电力系统断开,并在电枢端子之间接一个负载电阻。能耗制动适用于任何型式的推进电动机,并可利用电动机电枢绕组的短时过电流容量的优点减少制动时间。

3.2.3.3 推进电动机的再生制动

第二种方式称作再生制动,适用于推进电动机和船舶日用系统共享相同母线的场合。推进电动机的再生电力用于供电给一部分船舶日用负载,同时也可被柴油机吸收少部分能量,但必须注意不能让柴油机的逆功率过大。

3.2.3.4 能耗制动考虑

当推进系统独立于船舶日用系统时可以采用能耗制动。能耗制动的优点是可以设计成能产生最大制动,而不影响固态变流器的设计,缺点是电阻器散发的热量大。再生制动只能在推进和船舶日用系统共享公共母线时才能采用,它不需要附加设备,但它需要在船舶日用系统上有足够的负载以使制动高效。

3.3 对供电与推进系统的要求

(1) 供电系统应具备足够的过载能力以提供推进系统必须的转矩、功率以及在起动、机动操纵和紧急停车情况下所需的交流系统无功功率。

(2) 在全速前进情况下,进行螺旋桨从全速前进至全速后退的机动操纵过程中,原动机应能吸收一部分再生功率,以不会导致超速保护器动作而停机。

(3) 带动发电机的原动机应尽可能装有电子调速器。

(4) 推进系统的电源可以由专供推进用的发电机组供电,也可以由能向推进和日常负载供电的公共电站供电。公共电站应满足下列要求:

1) 电站的控制系统应保证在推进和日用负载之间安全地分配电力,如必要,可以采用卸掉非重要负载和(或)降低推进功率。

2) 在一台发电机组不工作时,剩余的机组应能向所有的重要设备和船舶的常用设备供电,同时应维持有效的推进。

3) 如果正常情况由两台或两台以上发电机组并联供电,调速器的稳定调速率应尽量相同并应能在整个运行转速范围内保持稳定运行。当一台发电机组突然断电时,运行中的剩余机组应足以保证重要设备的不间断运行和有效的推进。

4) 推进电机应能承受超速20%运行2min的考验。

5) 推进电机的轴承和润滑,在电机允许的倾斜范围内,应保证轴承良好地润滑和工作。润滑油(脂)不能从轴承中渗漏或溢出。

6) 推进电动机转子的直径应尽可能小,以减小转动惯量,减少反向或调速时的过渡时间,提高机动性。

7) 由静止式变流器供电的推进电动机,在设计中要考虑电源中谐波的影响。

8) 对在主电路设置过载保护装置,其整定值应足够大,以保证不会由于机动航行或在恶劣海况下航行时所产生的短时过电流使得该保护装置动作。

3.4 对监测与控制要求

(1) 推进控制应按机旁优先的原则设计,应使集中控制室(站)的控制比驾驶室(指挥舱)控制站的控制优先,机旁控制站的控制比集中控制室(站)优先。

(2) 推进控制应按故障安全的原则设计。故障安全不仅应考虑监控系统及与之有关的机电设备,而且应考虑整个推进系统,乃至舰船的安全。

(3) 电力推进系统应配备应急推进控制,该应急推进控制应独立于通常的遥控系统。

(4) 在丢失了转速反馈信号或系统给定信号的情况下,推进轴转速不应有较大的变化。

(5) 推进电机的紧急停止装置应布置在所有的操纵部位。紧急停止应独立于通常的停止装置,并且每个推进装置分开设置。

(6) 每一推进轴在操纵台上都应有单独的手柄。手柄移动的方向应与船舶航行的方向一致。

(7) 当使用电力推进时,发电和配电系统应设置一套自动控制系统,且该自动控制系统至少应有以下功能:

1) 确保足够的电力以便在任何时候都可实现安全操作。

2) 确保多台发电机组间的负载均匀分配。

3) 当电站过载时,执行负载开关的跳闸和/或卸载。

4) 当一台运行的发电机断开时,确保足够的电力以保证安全运行。必要时,可以断开非常用负载的供电。

5) 如果自动控制系统发生故障,电网的可用功率不应发生变化,即发电机不会自动起动或停止。

6) 控制推进电机转矩的最大输出。

7) 应设置推进操作的零位保护,使得推进系统故障或

其他原因断电后,必须把操作手柄回零位以后,才能重新启动或操作。

8) 监测报警系统一般应独立于控制系统,应在推进系统各工况下正常工作。当监测报警系统发生故障时,不应影响控制系统的正常工作。

9) 每台发电机的电流、电压、功率和功率因数,应确保为真实的方均根值。

10) 舰桥及控制室装有消耗功率和推进功率的指示器。

11) 在每个推进控制台应为旋度、速度、方位角的节距或方向提供指示或反馈信号。

3.5 维护保养要求

为了保证设备的长寿命和最大的可靠性,必须制定系统性的检测、清洁、调整和修理计划。

3.5.1 每日

(1) 检查运行设备的清洁度、振动是否过大、是否暴露在水中、轴承是否漏油、电刷是否有火花、是否有影响通风或阻碍活动部件的齿轮松动,以及检查轴承、通风空气和装有温度计或温度检测器的交流定子绕组等的温度。

(2) 进行表面检查,并清洁所有固定的推进电气设备。

(3) 检查舱底的水位,确保水不能溅入打开的电机绕组中。

3.5.2 每周

(1) 检查未在使用的推进电动机和发电机,确保它们被适当加热,以保持绝缘干燥。

(2) 测量并记录推进电动机、发动机、励磁机的对地绝缘电阻。记录环境温度和电机内的温度。

(3) 用手转动或通电运行一周内未使用的推进辅助设备。

(4) 把设备断电,打开已安装的控制器柜、推进控制柜和远程控制台的门,检测接触器和开关。检查连接是否松动、接地情况、有无破损部分、线圈或电阻是否烧坏等。必要时,进行清洁、调节和修理。

3.5.3 每月

(1) 检查所有润滑油冷却器的水密性和油密性。

(2) 检查那些装有静电空气过滤器的设备上的静电过滤器集尘装置。

3.5.4 每季度

(1) 检查套筒轴承上的对准度、间隙和磨损。必要时请更换润滑油。

(2) 从推进电动机、发电机、励磁机以及辅助推进电动机的前部和后部拆下外盖。检查和清洁每周或每月例行检查时一般未涉及的部件。

(3) 检查风扇的叶片是否松动或破损。

(4) 检查控制设备接线的紧固度、触点的间隙和对准情况。

(5) 检查推进辅助设备的运行速度,主要检测振动、磨损件、螺栓的松紧度、挡板以及轴键。检查额定负载下驱动辅助设备的电动机的输入电流。

(6) 检查备件库存量,必要时重新订购。

3.5.5 每半年

(1) 需要时,向推进设备(电动机、发电机、辅助设备)上的所有滚珠轴承添加润滑脂。

(2) 敲击和紧固基座和连接螺栓。检查螺栓是否磨损。

(3) 检查电缆是否受潮、是否脏,以及填料管的紧固度,吊架、配接件和电缆端密封。

3.5.6 每年

(1) 冲洗和清洁润滑油和冷却水系统内部。

(2) 把推进电缆与所有设备断开,并用适当的仪器测量每根电缆的绝缘电阻。

4 船舶电力推进的典型方案

4.1 采用 PWM 变频器的驱动装置

在德国 Puttgarden 与丹麦 Rødby 之间航行的两艘新型船艏同型渡船“Schleswig Holstein”和“Deutschland”于1997年投入使用。船艏同型渡船往返于码头之间而不用反向操纵,这缩短了总的巡回时间,因而增加了每艘船舶的运输能力。这型渡船无艏或艉,所以双方是一样的。为区别起见,根据它们的方位,称为“北”和“南”。4个螺旋桨具有导流罩的外形,并能作360°旋转。这种推进型式被叫做全回转推进。流体动力学的研究表明,在总的驱动装置的功率分成40%(前端)和60%(后端)的情况下具有最佳结果。其系统单线图如图5.1-4所示。

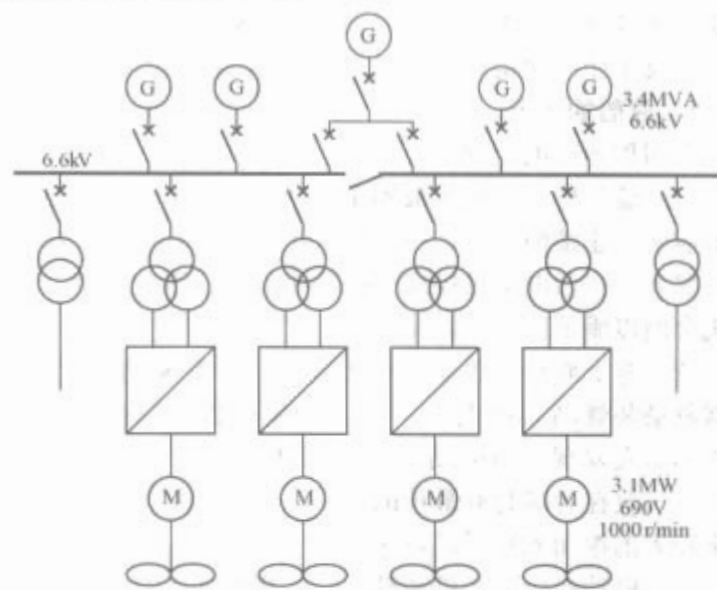


图 5.1-4 采用 PWM 变频器的驱动装置

在船上共有5台柴油发电机提供总量为16.9MVA的电力,主开关板的额定电压为6.6kV,船舶由四台功率均为3.1MW的异步推进电动机进行推进。它们的转速由标准的PWM变频器进行控制。在正常工况时,线路侧变频器变压器对电网形成24脉冲反馈。

4.1.1 开关板介绍

根据负载变化情况,最多有5台发电机(3×3.77MVA和2×2.8MVA)。为了提高可靠性,开关板按冗余设计,有“北面”和“南面”,两部分开关板组成,两部分开关板用一个汇流排连接件相连接,“南面”向4#(南一东)和1#(北一西)驱动装置供电,而“北面”向2#(北一东)和3#(南一西)驱动装置供电。通过这样交叉配电,在开关板的一部分出现故障情况下,可用开关板的另一部分以半速航行。

4.1.2 柴电驱动装置的说明

渡船柴电驱动装置的特点是有4个360°全回转螺旋桨,它们由PWM(脉宽调制)控制的3.1MW、690V异步电动机驱动,它们的额定速度是1000r/min。在电机侧,每台电动机由多个并联连接的电压源变频器供电。

5个并联的800kVA、690V标准的IGBT(绝缘门极双极性晶体管)变换器用来向每台3.1MW电动机供电。三绕组变压器直接向两个6脉冲二极管整流器供电,在三角形

(d) 与星形(Y)连接的输出绕组之间有 30° 相位移,4个驱动装置的每一个向电网产生12脉冲反馈,并且提供给PWM逆变器的直流电源只有很低的脉动分量,一次侧为三角型连接而二次侧为星形和三角形连接(Dyd)的变换器变压器在线路侧被设计成具有 $\pm 7.5^\circ$ 相位移绕组,这样就允许向电网提供总数为24脉冲的反馈。

在这种应用中,只需要一个单象限驱动系统,如果能量的再生是有效的或可能的,线路侧的二极管整流器可以改成正弦波变换器,这样就能整流和逆变。

4.1.3 低压(LV)开关板的介绍

两台2MVA、6.6kV/0.4kV变压器向船上辅助的低压负载(照明、空调、厨房、洗衣房、机舱、不停电电源等)供电。这个400V开关板建成一个具有接地中性点的三相四线系统。如果一台变压器出故障,则400V汇流排可转接向低压负载供电。在正常运行期间,汇流排连接件是打开的。

某些上述负载采用电力电子器件作电源,这些负载也会通过它们的谐波电流引起电网的污染,这是除了变换器以外的驱动装置设备。由于这个原因,当驱动装置不运行时,在低压(及中压)时将有一个较大的THD系数。

4.1.4 渡船的工况

有四种不同的工况:

(1) 港口作业。渡船被固定于凸式码头上。通常驱动装置不运转,正常情况下,一台发电机向开关板供电。在遇风的情况下,一台电动机用来支持码头设备。因此,第二台发电机合闸以满足所需的功率。

(2) 海上航行。渡船航行于公海。所有驱动装置运转。根据驱动装置功率的大小,3~5台发电机在运行,流体动力学的研究发现:当驱动装置的总功率的40%放在船的前端,60%放在后端时有最佳的效果,驱动功率的其他配置将带来较大的振动和较低的航速。

(3) 机动航行。在机动航行时,渡船处于在公海中航行与在港口航行状态,由于它的艏艉同型原理,在靠码头与出航时渡船不必予以反向。

(4) 应急航行。在驱动系统故障的情况下,或在应急情况下,渡船可利用一半驱动设备航行。对于这种运行方式,中压开关板的两部分之间的汇流排连接件是打开的,所以它设计的冗余性得到利用。

4.2 采用电流源变换器的驱动

航行于地中海与加勒比海上的定期游船于1998年交付使用。定期游船的排水量约为109000t,290m长,可容纳2600名旅客,1150名船员。

船上有6台柴油发电机,共提供84MVA电力,最大巡航速度为15节($2 \times 21\text{MW}$ 调速变换器供电的驱动装置)。主开关板的额定电压是6.6kV,频率60Hz。低压开关板的

用户如厨房、洗衣房、照明、空调、电影院和媒介设备等总数约11~13MW,这些负载也包括变换器(例如单相或三相整流器)。

4.2.1 开关板介绍

电力管理系统提供足够的电力给船舶电网,当需要时把这些发电机进行联机。

开关板划分成两个对称的部分。在正常航行时,汇流排连接件是闭合的。在机动航行期间,汇流排连接件被打开,为航行中这一关键时段提供较高的可靠性。

开关板两部分中的每一部分由多达3台、其相对次瞬态电抗为 $X_d = 0.16$ 的发电机供电。

4.2.2 柴电驱动装置的介绍

游船的柴电驱动装置的主要特点是两台21MW直接与轴系相连接的无刷励磁同步电动机。电动机的额定转速是150r/min。每台推进电动机由2个绕组系统组成。这就提供了一个高冗余度的驱动系统并减小了转矩脉动。在一个绕组系统或它的供电变换器发生故障的情况下,定期游船能利用减小推进电动机的功率而保持126r/min的转速。

两个电动机绕组系统彼此移位 30° ,其中每个绕组系统是由一个6脉冲型电流源变换器供电的,利用一种标准的Ddy形(或者一个是 Δ/Δ 形,另一个是 Δ/Y 形)变换器变压器的设计,能实现对电网的12脉冲反馈。为进一步减小对电网的冲击,21MW驱动装置的变换器变压器的线路侧彼此移位 $\pm 7.5^\circ$,这样对电网提供24脉冲反馈。

4.2.3 谐波滤波器的介绍

为减小对推进系统和其他低压板用户的冲击,在本定期游船上安装了两个谐波滤波器,滤波器有高通特性并被修整到第5次谐波。滤波器的第2个作用是改善电网的功率因数。

4.2.4 游船的工况

有以下几种主要的工况:

(1) 港口作业。定期游船被固定于凸式码头或停泊于锚地,为了向船舶供电,两台发电机在线。

(2) 机动航行。在机动航行期间,为了有较高的可靠性,开关板被分成两部分。根据负载情况,每台推进电动机最多可由三台发电机供电。

(3) 海上航行。汇流排连接件闭合,开关板由6台发电机供电,两台电动机运行,对电网产生24脉冲反馈。

(4) 应急航行。在一个变换器故障时,推进电动机仅由一个绕组系统供电,这导致对分成左、右舷电网的12脉冲反馈,由于冗余性原理,使定期游船仍能以减速(126r/min)航行。

(5) 紧急停车操纵。系统能进行这种操纵。在这种操纵期间,推进电动机运转到零速作为由螺旋桨带动的发电机,紧接着推进电动机倒车加速到最大的倒车速度以使船舶在尽可能短的时间内停下来。

第2章 船舶电力推进装置

1 船舶电力推进系统的设计

为进行船舶电力推进系统的合理设计和管理,应通过对各种工况条件下船、机、桨特性及配合的分析,特别是进行受机电能量转换过程支配的船舶电力推进系统的动力学关系分析,了解系统运行的经济性、适应性及工作范围和限制,揭示系统特性参数的变化规律,从而确定船、机、桨的最佳匹配点。

1.1 船舶电力推进系统的负载特性

由于船舶电力推进系统的负载一般为螺旋桨负载,因此这里仅以螺旋桨负载作为分析的对象。本节未作特殊说明的均指螺旋桨负载。

1.1.1 螺旋桨负载特性简析

螺旋桨特性指的是螺旋桨转矩、功率与转速之间的关系曲线,即 $M = f_1(n)$ $P = f_2(n)$ 曲线。最常用的是下面三条典型特性曲线:

- 1) 自由航行特性: $M_y = f_1(n)$ $P_y = f_2(n)$ 。
- 2) 系缆特性或抛锚特性: $M_x = f_1(n)$ $P_x = f_2(n)$ 。
- 3) 反转特性: $M_t = f_1(n)$ 。

1.1.1.1 自由航行特性

满载船舶在静水中航行时所得出的螺旋桨阻转矩(或功率)与其转速的关系曲线称为自由航行特性,曲线见图 5.2-1。自由航行特性表达式为

$$M_y = k_y n^2 \quad (5.2-1)$$

$$P_y = k'_y n^3 \quad (5.2-2)$$

对于自由航行特性上的每一个螺旋桨转速对应有一个确定的船舶航速;整条特性对应有很多个不同的航速。

1.1.1.2 系缆(抛锚)特性

满载船舶在航速等于零时所得出的螺旋桨阻转矩(或功率)与其转速的关系曲线称作系缆特性或抛锚特性,曲线见图 5.2-1。系缆特性表达式为

$$M_x = k_x n^2 \quad (5.2-3)$$

$$P_x = k'_x n^3 \quad (5.2-4)$$

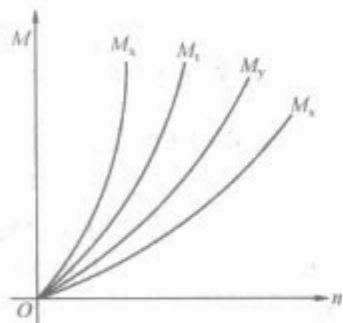


图 5.2-1 螺旋桨特性曲线

在自由航行特性上,螺旋桨每个转速对应有不同的航速,而系缆特性航速总为零。

1.1.1.3 螺旋桨反转特性

当航速不变时,螺旋桨反转过程中其阻转矩与转速的关系曲线称为螺旋桨反转特性曲线。螺旋桨的反转特性曲线有非常奇特的形状,如图 5.2-2 所示。 M_{yd} 、 M_t 分别为原动机和螺旋桨转矩,图上表示的正值转矩是螺旋桨正转转矩,负值则为螺旋桨反转转矩。

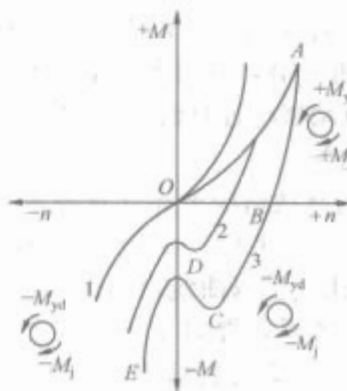


图 5.2-2 螺旋桨反转特性曲线

在论及螺旋桨反转特性时,必须把螺旋桨本身的反转与船舶倒车区别开来。为使船舶倒车,必先使螺旋桨反转;螺旋桨反转时间甚短,以秒计。但船舶倒车(例如由全速前进到全速后退)所需时间甚长,是以分钟来计算的。二者在过渡过程中的时间,后者是前者的 100~150 倍,因此可以认为,在船舶倒车的一定阶段上,船舶还是几乎以全速继续航行,尽管螺旋桨这时已经在后退方向旋转了。

在反转时,由于这种情况而引起螺旋桨阻转矩有非常特殊的变化,如图 5.2-2 所示。

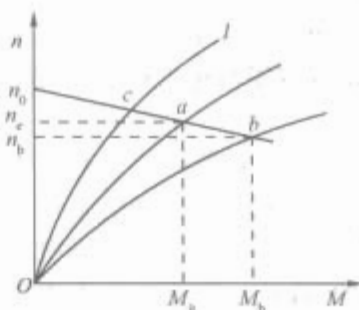


图 5.2-3 螺旋桨与电动机的共同工作特性

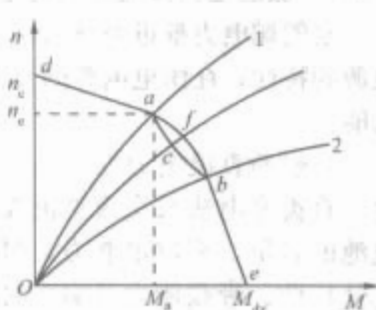


图 5.2-4 电动机的理想机械特性

1.1.2 螺旋桨对推进电机机械特性的要求

螺旋桨是推进电动机的工作对象,推进电动机的特性必须与螺旋桨的特性相适应,彼此才能很好地配合工作。通常螺旋桨对电动机特性的要求是:

(1) 电动机理想空载转速 n_0 必须能够自动限制,不允许太高。一般设计为 $n_0 \leq 120\% \sim 150\% n_n$ 。如果电动机空载转速远大于额定转速,则当螺旋桨出水(船舷在大风浪中颠簸时常有可能)或者脱落时,电动机负载大为减小,电动机转速将大大升高,使电动机受到很大的机械性损害。

(2) 电动机的“堵转”转矩必须能够自动限制,也不允许太高,一般设计为 $M_{dt} \leq 150\% \sim 250\% M_n$ 。这是因为螺旋桨,特别是港口作业船、破冰船等的螺旋桨,容易被钢

缆、冰块等卡住,使得电动机发生“堵转”,即使电动机转速急剧降低到零,流过电动机电枢的电流迅速增大,电动机的电磁转矩变得很大。电流和电磁转矩的增大使电动机电枢过热、电机和轴系机械应力过大。因此电动机“堵转转矩”应受到限制。

(3) 当负载变化时,电动机的功率应该获得比较充分的利用。船舶航行中,特别是在风浪中,电动机的负载经常发生变化,表现为螺旋桨特性经常在自由航行特性两侧发生变动。这时要保持电动机在某一点(比如 a 点,见图5.2-3)的稳定工作是不可能的。当负载增大时(其极限是螺旋桨特性由自由航行特性变到负载特性),电动机将过渡到 b 点工作, b 点既在电动机机械特性上,又在螺旋桨负载特性上,可以看到,在 b 点转速与 a 点的差不多,而转矩却远大于 M_a 。这将使电动机过载,并引起发电机和原动机过载。而当负载减轻时,电动机将过渡到 c 点工作,电动机将严重欠载,功率利用不充分。

为了能够比较好地适应上述几点要求,电动机机械特性必须具有如图5.2-4所示的形状。在这条特性曲线 $dacbe$ 的 acb 段,曲线呈双曲线形,在 acb 段的每一点始终具有 $Mn=const$ 的关系,即对于该曲线上的每一点,电动机输出功率相等。电动机的这种状态称为“恒功率”状态。 a 点是在螺旋桨负载特性1上,而 b 点在螺旋桨负载特性2上,这就保证电动机的负载在1、2之间变化时,电动机将能自动维持“恒功率”运行,电动机功率不会过载,因而发电机和原动机功率也不会过载。转矩虽然大于额定值,但它在电动机允许的转矩过载范围之内,不致引起电和机械性的损害。

这条特性的 d 点限制了电机的空载转速,而 e 点限制了电机的堵转转矩。它们的数值均可设计在允许范围之内。

1.2 船舶电力推进系统的技术要求

1.2.1 船舶电力推进系统的电源

对船舶电力推进系统来说,在设计过程中必须考虑供电电源的特性,在供电电源的允许范围内实现电力推进系统的功能。

对船舶直流电力推进系统来说,供电电源通常有蓄电池、直流发电机及交流整流发电机三种。设计之前须对蓄电池的容量、充放电能力、过渡电压等指标,直流发电机的外特性、带载能力及响应时间等指标,交流整流发电机的电压脉动率、外特性、带载能力及响应时间等指标进行详细分析,确保电力推进系统在整个调速范围内满足要求。

对船舶交流电力推进系统来说,在设计之前必须对供电电源的特征参数,如电压和频率的等级、稳态与瞬态波动范围、平衡度及谐波含量等指标进行详细分析,进而确定系统的拓扑结构、绝缘等级及保护方式等,实现系统的功能和性能。

1.2.2 对船舶电力推进系统的基本要求

1.2.2.1 功能和性能要求

- (1) 船舶电力推进系统的参数应匹配、协调。
- (2) 船舶电力推进系统一般应具有较宽的调速范围,并且在调速范围内转速能连续可调。
- (3) 船舶电力推进系统一般应具有反转控制等功能。
- (4) 船舶电力推进系统一般应具有多种操作方式。
- (5) 船舶电力推进系统应设置必要的状态检测、指示及

报警与保护。

(6) 船舶电力推进系统设计必须考虑船舶制动过程中的能量回馈。

(7) 对于双轴以上的船舶电力推进系统应保证每一推进轴的电气设备能独立工作。

1.2.2.2 外形尺寸、质量与接口要求

(1) 船舶电力推进系统所属设备在满足功能情况条件下,应结构简单、质量(重量)轻、尺寸小,且便于安装、调试、操作和维修。

(2) 船舶电力推进系统中的推进电动机和发电机的轴线应与船的艏艉线平行。

(3) 船舶电力推进系统中设备的布置应尽量使操作人员操作时面朝船舶。

1.2.2.3 可靠性、安全性与可维修性要求

- (1) 预期的工作寿命要求。
- (2) 船舶电力推进系统的平均无故障工作时间(MT-BF)要求。
- (3) 船舶电力推进系统应设置必要的电气和机械联锁。
- (4) 船舶电力推进系统一般采用冗余设计,用备份的办法提高生命力。
- (5) 船舶电力推进系统的推进电动机应采取有效措施防止轴电流,当采用轴承绝缘措施时,也应将非驱动端轴承加以电气绝缘,与绝缘轴承连接的金属管和其他导电连接件也要电气绝缘。

(6) 船舶电力推进系统的一般电气安全要求、电气间隙和爬电距离、绝缘电阻及安全接地等必须满足《钢质海船入级与建造规范》的要求。

(7) 船舶电力推进系统中的各设备装船前应具有制造厂合格证书,首制船的电力推进系统及设备一般应经陆上联调。

1.2.2.4 标准化、系列化与通用化要求

船舶电力推进系统及设备中采用的元器件、组件一般应尽量标准化、系列化,且易于互换。

1.2.3 船舶电力推进系统的环境要求

船舶电力推进系统各设备的运行须满足《钢质海船入级与建造规范》所要求的环境条件。

1.2.4 电磁兼容性要求

- (1) 船舶电力推进系统的电磁兼容性设计应符合相关标准要求。
- (2) 电力推进系统中的电气设备在设计中应使杂散磁场减至最小。

1.2.5 振动和噪声要求

用于特殊场合的船舶电力推进系统,其设备的振动和噪声指标须满足客户提出的要求。

1.3 船舶直流电力推进系统的分析与计算

1.3.1 船舶直流电力推进系统的匹配性设计

1.3.1.1 船舶直流电力推进系统的输出功率确定

通常,船舶电力推进系统输出功率须通过船模拖曳来获得,由船舶总体给出。但在船舶电力推进系统的论证阶段,常需要估算这个功率。对水下工作船来说,在设计中一般采用海军部系数法进行估算。一般情况下,船舶电力推进系统基本工况时的输出功率可表示如下

$$P_0 = 0.735 (D^{2/3} V^3) / C \quad (5.2-5)$$

式中: P_0 为推进电动机的输出功率,kW; D 为排水量,t(采用水下排水量计算); V 为基本工况时的航速,节; C 为

海军部系数。

注：海军部系数 C 是一个与船型有关的常数，可根据船舶设计可能达到的水平初估一个 C 值，通常根据母型船和设计中准备采取的快速措施来确定，随着船舶技术的发展和船舶性能的提高，海军部系数是逐年提高的，在第一、二次世界大战期间这个系数不大于 $60 \sim 90$ ，现在可达 $300 \sim 350$ 。

1.3.1.2 船舶直流电力推进系统的电源分析

以蓄电池组容量分析为例。

(1) 设计的基本原则。一般有两种方法，具体视设计的目标而定：

1) 以短时放电率为基本工况，校验长期放电率是否满足最大续航力的需要。

2) 以满足水下最大续航力为基本工况，而对短时放电率工况则作必要的校验和修正。

(2) 电池组容量的估算。基本工况在整个运行周期内舰船所需的总能量

$$W_Z = W_T + W_F + W_W \tag{5.2-6}$$

式中： W_T 为运行周期内，电力推进设备所需的能量，kWh； W_F 为运行周期内，全船辅机所需的能量，kWh； W_W 为运行周期内，网络上损耗的能量，kWh。

(3) 蓄电池总体估算。

$$G_Z = W_Z / W_R \tag{5.2-7}$$

式中： G_Z 为蓄电池的质量比能，kWh/kg； W_Z 为基本工况在整个运行周期内舰船所需总能量； W_R 为蓄电池的质量，kg。

$$V_Z = W_Z / W_V \tag{5.2-8}$$

式中： V_Z 为蓄电池体积比能，kWh/l； W_Z 为基本工况在整个运行周期内舰船所需总能量； W_V 为蓄电池的体积，l。

(4) 蓄电池的组数 N_g 。根据推进电动机的台数、电压、电流和水下最大续航所需容量决定电池组数。

(5) 单组蓄电池的个数 n_d 。 n_d 由推进电动机工作电压和全船由蓄电池供电的辅机的幅压范围决定每组个数。

1.3.1.3 船舶直流电力推进系统的调速

(1) 调速速区的划分。由公式 $n = (U - RI) / (C_e \Phi)$ 知，直流电机的调速有改变电枢电压调速、串电阻调速及改变磁通调速三种。当要求船舶直流电力推进系统具有宽广的调速范围（如调速比达 $1 : 10$ 左右）而且转速连续可调时，采用单一的调速方式一般情况下难以实现，这是因为：

1) 若采用单一的改变电机磁通来调速，则在整个调速范围内磁通变化较大；最大磁通增大必使推进电动机体积增大，而在最低转速时推进电动机效率太低，此外磁场减得太弱使推进电动机不能很好稳定的工作。

2) 若采用分级改变电枢端电压调速，则在整个调速范围内只能得到几个点；若点数太多，又会导致控制复杂。

3) 若采用改变电枢回路电阻来调速，由于能耗太大也不经济。

所以一些特殊的船舶直流电力推进系统（如潜艇直流电力推进系统）为满足使用要求，一般采用分级改变电枢端电压和改变磁通相结合的综合调速方式。图 5.2-5 就是这种系统参数变化的典型曲线。

(2) 转换点的选取。对图 5.2-5 所示的系统，通过蓄电池组的串并联开关和推进电机串并联开关的通断组合，在推进电机的一个电枢上可以获得三种电压。因此，该系统就有三个调速区。按推进电机电枢供电电压高低的顺序，三个调速区分别称为高速区、中速区和低速区。由改变主电路连接

方式而使调速区改变的过渡点称为转换点。由高速区过渡到中速区的过渡点称为第一转换点，由中速区过渡到低速区的过渡点称为第二转换点，依此类推。

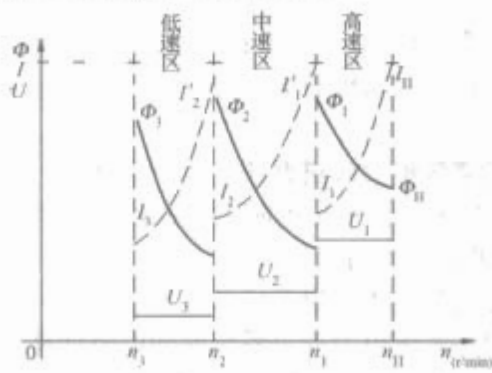


图 5.2-5 综合调速各参数变化的典型曲线

1) 转换点的选取原则。

a. 转换点前的最大磁通 Φ_{max} ，不能使推进电动机体积增加太多。

b. 转换点后的电枢电流，一般控制在基本工况电枢电流的 1.1 倍左右。

2) 转换点的数目。一般情况下，转换点的数目可按表 5.2-1 所示调速范围选取。

表 5.2-1 转换点数目		
序号	调速范围	转换点数目
1	$1 : 2.5$	1
2	$1 : 4 \sim 6$	2
3	$1 : 6 \sim 10$	3

3) 第一转换点的选取。一般选取半功率点作为第一转换点，即 $P_1 = P_H / 2$ 。由转速和功率的关系，有

$$n_H / n_1 = (P_H / P_1)^{1/3} \tag{5.2-9}$$

将 $P_1 = P_H / 2$ 代入式 (5.2-9)，可得第一转换点转速 n_1

$$n_1 = 0.794 n_H \tag{5.2-10}$$

上两式中： P_H 为基本工况的推进功率，kW； P_1 为第一转换点的推进功率，kW； n_H 为基本工况的转速，r/min； n_1 为第一转换点的转速，r/min。

4) 第二转换点的选取。为不使效率过低，一般取 $\Phi_2 = 0.85 \Phi_{max}$ ，而 Φ_{max} 一般由下式确定

$$\Phi_{max} = E_1 / [(E'_1)^{1/3} (E_H)^{2/3}] \cdot (I_H / I'_1)^{1/3} \cdot \Phi_H \tag{5.2-11}$$

则第二转换点的转速 n_2 可由下式计算出

$$n_2 = n_H \cdot (U_2 / U_H) \cdot (\Phi_H / \Phi_2) \tag{5.2-12}$$

上两式中： n_2 、 n_H 分别为第二转换点和基本工况的转速，r/min； U_2 、 U_H 分别为第二转换点前和基本工况推进电动机的电枢端电压，V； Φ_2 、 Φ_H 分别为第二转换点前和基本工况推进电动机的磁通，MX； Φ_{max} 为推进电动机最大磁通，MX； E_1 、 E'_1 、 E_H 分别为第一转换点前、后和基本工况推进电动机的电动势，V； I'_1 、 I_H 分别为第一转换点后和基本工况的电枢电流，A。

5) 第三转换点的选取。为不使效率过低，一般取 $\Phi_3 = 0.8 \Phi_{max}$ ，则第三转换点的转速 n_3 可由下式计算出

$$n_3 = E_3 / (C_e \Phi_3) \tag{5.2-13}$$

式中： Φ_3 为第三转换点前推进电动机的磁通，MX； E_3 为第三转换点前推进电动机的电动势，V； C_e 为推进电动机的电动势常数（由推进电动机计算提供）。

6) 最小转速对应的磁通。最小转速由总体设计给出。按下式估算最小转速对应的磁通

$$\Phi = E_3 / (C_e n_{\min}) \quad (5.2-14)$$

式中: Φ 为最小转速对应的推进电动机磁通, 10^{-8} Wb; E_3 为低速区推进电动机的电动势, V; n_{\min} 为推进电动机最小转速, r/min。

1.3.2 船舶直流电力推进系统的保护设计

船舶直流电力推进系统的保护设计见本章第4节船舶电力推进系统的安全性与保护。

1.3.3 船舶直流电力推进系统的计算

1.3.3.1 船舶直流电力推进系统起动电阻计算

船舶直流电力推进系统起动电阻计算的前提条件通常有两种, 一种为固定起动过程中的最大起动电流, 另一种为固定各级起动电阻切除时间。本节按第一种前提条件进行起动电阻的计算。

(1) 起动电阻阻值计算 (解析法)。

1) 起动级数 m 已定。

a. 选取起动过程中的最大电流 I_1 。

b. 计算第 m 级起动电枢电路总电阻 R_m

$$R_m = U_n / I_1$$

式中: U_n 为额定电压。

c. 计算起动电流比 β

$$\beta = \sqrt[m]{R_m / R_a}$$

d. 计算各级起动电阻

$$R_1 = R_a \beta, R_2 = R_a \beta^2, \dots, R_m = R_a \beta^m$$

e. 计算各分段电阻

$$R_{\Omega 1} = R_1 - R_a = (\beta - 1) R_a$$

$$R_{\Omega 2} = R_2 - R_1 = \beta R_a$$

...

$$R_{\Omega m-1} = R_{m-1} - R_{m-2} = \beta^{m-2} R_a$$

$$R_{\Omega m} = R_m - R_{m-1} = \beta^{m-1} R_a$$

2) 起动级数 m 未定。

a. 选取起动过程中的最大电流 I_1 和电阻切除时的切换电流 I_2 。

一般选取, $I_1 = (1.5 \sim 2.5) I_n$, $I_2 = (1.1 \sim 1.2) I_n$, I_n 为额定电流。

b. 计算初步起动电流比 β

$$\beta = I_1 / I_2$$

c. 计算第 m 级起动电枢电路总电阻 R_m

$$R_m = U_n / I_1$$

d. 计算初步起动级数 m

$$m = \lg(R_m / R_1) / \lg \beta$$

如果求得的 m 为分数值, 则将其加大到相近的整数 m_1 。

e. 计算起动电流比 β

$$\beta = \sqrt[m_1]{R_m / R_a}$$

f. 计算各级起动电阻

$$R_1 = R_a \beta, R_2 = R_a \beta^2, \dots, R_m = R_a \beta^m$$

g. 计算各分段电阻

$$R_{\Omega 1} = R_1 - R_a = (\beta - 1) R_a$$

$$R_{\Omega 2} = R_2 - R_1 = \beta R_a$$

...

$$R_{\Omega m-1} = R_{m-1} - R_{m-2} = \beta^{m-2} R_a$$

$$R_{\Omega m} = R_m - R_{m-1} = \beta^{m-1} R_a$$

例 5.2-1 一台他励直流电动机的铭牌数据为: 额定功率 $P_n = 29$ kW, 额定电压 $U_n = 440$ V, 额定电流 $I_n = 76$ A, 额定转速 $n_n = 1000$ r/min, 电枢绕组电阻 $R_a = 0.377 \Omega$, 试用解析法计算 4 级起动时的起动电阻值。

解: 已知起动级数 $m = 4$

选取 $I_1 = 2I_n = 2 \times 76 \text{ A} = 152 \text{ A}$

$$R_m = R_4 = U_n / I_1 = 44$$

$$\beta = \sqrt[4]{R_4 / R_a} = \sqrt[4]{2.89}$$

则各级起动总电阻如下:

$$R_1 = R_a \beta = 0.377 \times 1.664 \Omega = 0.627 \Omega$$

$$R_2 = R_1 \beta = 0.627 \times 1.664 \Omega = 1.042 \Omega$$

$$R_3 = R_2 \beta = 1.042 \times 1.664 \Omega = 1.735 \Omega$$

$$R_4 = R_3 \beta = 1.735 \times 1.664 \Omega = 2.895 \Omega$$

各分段电阻如下:

$$R_{\Omega 1} = R_1 - R_a = (0.627 - 0.377) \Omega = 0.250 \Omega$$

$$R_{\Omega 2} = R_2 - R_1 = (1.042 - 0.627) \Omega = 0.415 \Omega$$

$$R_{\Omega 3} = R_3 - R_2 = (1.735 - 1.042) \Omega = 0.693 \Omega$$

$$R_{\Omega 4} = R_4 - R_3 = (2.895 - 1.735) \Omega = 1.160 \Omega$$

(2) 起动电阻等效发热电流计算 (数值积分法)。

1) 计算一次起动过程中起动电阻电流二次方的积分值 Q_{qd}

$$Q_{qd} = \int_0^{T_{qd}} i_a(t)^2 dt \quad (A^2 \cdot s)$$

式中: T_{qd} 为一次起动过程的时间, s。

2) 计算一次反转过程中起动电阻电流二次方的积分值 Q_{fx}

$$Q_{fx} = \int_0^{T_{fx}} i_a(t)^2 dt \quad (A^2 \cdot s)$$

式中: T_{fx} 为一次反过程的时间, s。

3) 计算起动电阻的等效发热电流 I_{eq}

$$I_{eq} = \sqrt{kQ / T_r} \quad (A)$$

式中: Q 为 Q_{qd} 、 Q_{fx} 中较大者; T_r 为起动电阻的发热时间常数, s; k 为考虑起动电阻温度达到其发热时间常数所对应的允许温度过程中的起动次数, 一般取 $k = 3$ 。

1.3.3.2 船舶直流电力推进系统过渡过程计算

船舶直流电力推进系统过渡过程计算见本章第3节船舶电力推进系统的过渡过程。

1.3.3.3 船舶直流电力推进系统短路电流计算

(1) 短路计算点的选取。对船舶直流电力推进系统来说需进行短路计算的位置一般有以下几个:

- 1) 蓄电池断路器。
- 2) 电池组串、并联开关。
- 3) 推进电动机电枢断路器。
- 4) 电缆与控制板连接处。

(2) 确定电力推进系统可能产生最大短路电流的工况。

1) 蓄电池组可能产生最大短路电流的工况, 在充好电而未放电的时刻, 若是电池组并联充电, 基本工况放电时又是串联, 应以串联状态计算。

2) 推进电动机可能产生最大短路电流的工况, 可能出现在第一转换点前, 因为此时推进电动机反电动势最高。

(3) 短路电流的计算步骤。

- 1) 确定所必须的原始数据。
- 2) 选择计算点。
- 3) 计算所必须的原始数据。
- 4) 采用下列方法建立计算模型。
 - a. 电池组短路电流计算按等效电动势和等效电阻法。
 - b. 推进电动机按逐点计算法。
- 5) 计算某一点的短路电流。
- 6) 在某一点短路时, 校核远离的其他断路器能否分断。

2 船舶电力推进控制

2.1 主推和辅推的电力传动

通常情况下, 电动机用于将电能转变成为机械能, 像电力推进、辅助推进、定位及其他如起重机、泵、风机等那样的负载。典型情况下, 船上有 80%~90% 的负载是电动机。

2.1.1 直流电机

直流电动机要求有直流电源供电, 现在通常情况下的发电系统是三相交流的。这意思是说, 现在的直流电动机几乎总要经由一套可控整流装置供电。这个供电单元也负责电动机的调速。

2.1.2 异步电动机

异步电动机是工业应用中的主力军。现代设计能保证它坚固且简单, 在大多数情况下, 还能保证其长期连续运行而不需要维护。它能适合各种各样的用途, 对调速应用, 可将它直接挂到电网上, 或通过固体变频器供电作调速运行。

2.1.3 同步电动机

目前, 除非大功率推进, 一般情况下船舶上不大使用同步电动机。推进使用的典型情况总大于 5MW, 此时电动机直接与推进轴连接。在大于 8~10MW 时, 电动机通过齿轮箱与推进轴连接。低于该功率级别时, 常用的同步电动机缺乏经济上的竞争力。同步电动机的设计与发电机的设计是相似的。在船舶的变速驱动应用中, 一般情况下不使用没有变频器控制供电的同步电动机。

2.1.4 永磁同步电动机

永磁同步电动机使用在工业环境中某些低千瓦级别场合, 也用于直接起动场合。近年来, 它已开始进入大功率级别的应用。首先在军船上出现过数兆瓦级的应用, 而目前也在吊舱式推进中采用。该款式的优越性是采用紧凑的设计还能获得高的效率, 对吊舱式推进特别有意义的是: 只需要舱位更小的设备安装面积、可直接采用水冷去代替吊舱中电机的空冷及简化结构与设备的安装施工。

电动机直接投入电网时, 其转速将会很快升至由电网频率决定的速度上。对主推、辅推、泵、吊车等, 可以通过控制这些设备在运行期间的空载损耗, 节约电力或燃料的消耗量。同样地, 通过对推进电动机转速的有效控制, 还能够极大提高负载的有效性。由于早期需要增加额外的投资, 并且增加的设备又需要维护, 所以负担首先来自于经济方面。如果这种投资合理的话, 就应该能够通过减少运行费用或是增加赢利去回收早期的投入。

通用的传动装置有:

- (1) 交流电机电压源逆变器 (VSI) 型变换器, 如异步、同步和永磁同步电机。
- (2) 交流电机电流源逆变器 (CSI) 型变换器, 通常为同步电机。
- (3) 交流电机循环换流器 (Cyclo), 通常用于同步电机。

- (4) 直流电机的 DC 变换器或 SCR (晶闸管整流器)。

船上, 大多数交流电动机采用变速驱动。除循环变流器外, 那些传动装置都是取线电压进行整流, 其后逆变, 以提供电动机的变频和变压供电。

一台电动机控制器, 包含了转速的控制和通过控制整流器及/或逆变器中开关元件实现的电动机电枢电流的控制。通常情况下, 必须要有一个接口, 用以实现与主控系统、船舶管理系统、机动操纵系统或动力定位控制的连接。这个电动机的控制器, 需要来自于安装在电动机和传动设备上的传感器的测量和反馈信号。此类信号典型的有由测量获得的电动机的电枢电流、转速, 还有一些特征性的温度值。

图 5.2-6 中表示出一台带直流环节的频率变换器。其典型的情况是电压源型 (VSI) 或者是电流源型 (CSI) 变换器。

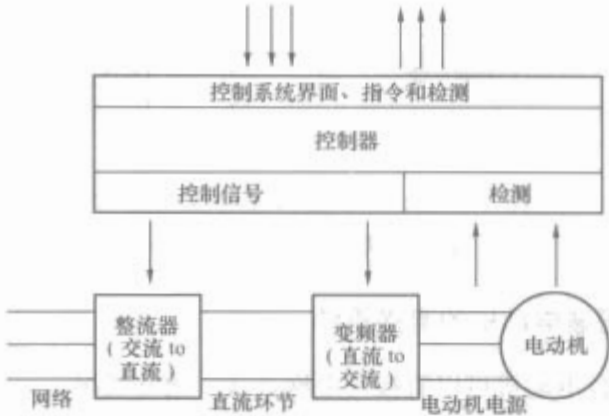


图 5.2-6 一台调速传动装置的示意图

如有设计上的需要, 一台电动机可以作驱动或制动方式的任一种运行。经常采用象限这个术语去区分上面所说的运行方式。将一个转速—转矩特性平面划分为四个象限。如图 5.2-7 所示, 一台在 I、III 象限中运行的电动机, 其转轴将对负载输出功率。相反, 当电动机在 II、IV 象限中运行时, 机械功率将从负载传入电动机。



图 5.2-7 电动机四个象限图

电动机传动方式, 经常是根据使用要求按它所工作的象限进行设计的。例如用于从负载吸收再生功率的设计。4 个象限涉及到转矩—转速特性曲线。

电动机的驱动, 一般情况下由一个转速的控制函数组成, 并且可以将该函数的输出解释成一个转矩指令或转矩参考指令。这个指令构成电动机控制算法的输入。这些算法使用了数量不一的电机模型, 去控制整流器 (如可控) 和逆变器中开关元件的断开或闭合, 控制电动机的电流及电压。

原则上说,控制器可以如图 5.2-8 所示那样,用一个框图来表示。要得到转矩控制,可以通过前向移动速度控制环来实现,并且将转矩基准作为对电动机驱动的一个直接输入。如图 5.2-8 的虚线所示。通常情况下,电动机的转速由测量获得,但现在新型电动机控制器中,设计有转速估算单元。这种(软件)估算器可以免除大多数船舶上推进电动机的专用转速传感器。

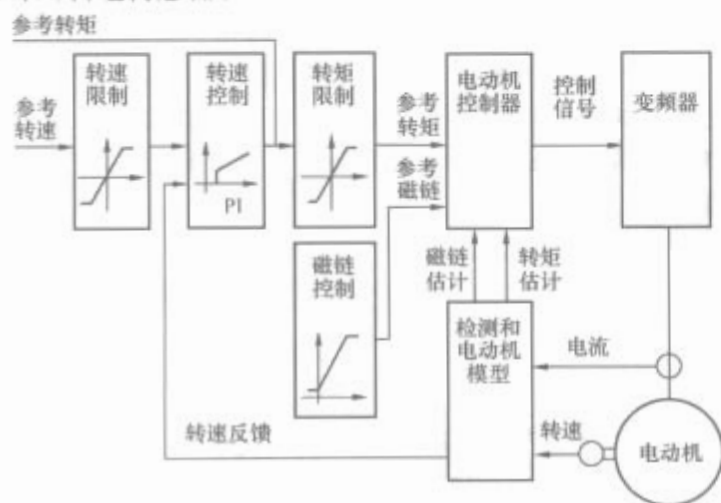


图 5.2-8 一个电机驱动控制器的简单而典型的控制结构图

2.2 恒速电动机的直接驱动

一台电动机可以直接与电网连接,通常情况下,这种可以直接投入电网运行的是三相异步电动机。异步电动机具有一个简单而且坚固的设计。其定子三相绕组与一台发电机的定子绕组是相同的。由叠片式的铁心组成圆柱形转子,在其中有一套类似于前面介绍过的同步电机的阻尼绕组那样的短路绕组。空载情况下,加在电动机定子绕组上的电压,会在电机中产生一个磁场。这个磁场会穿越气隙和转子旋转。转速由外加在定子绕组上的电压频率确定,这个频率被称之为同步频率 f_s 。同步频率对应的转速称为同步转速 n_s ,表示为

$$n_s = f_s \times 60 / (p/2) \quad (\text{r/min}) \quad (5.2-15)$$

异步电动机的转轴带上负载后,转子的速度会慢下来,同时转子的绕组中则感生出电流。(被转子带着旋转的)该转子电流,相对于定子绕组电流形成的同步旋转磁场旋转。在此基础上提出一个转差率 s 的定义。它表示电动机的(轴)转速相对滞后于同步转速 n_s 。

$$s = (n_s - n) / n_s \quad (5.2-16)$$

理论上,转差率可从 0 (空载) 变到 1 (制动状态)。大多数电动机,在额定负载时的设计取值通常低于 0.05 (5%),对于大型电动机还要低 (2%~3%)。

从异步电动机的电气模型看,转子和定子的电流可以用一个数学公式展开,而轴转矩和功率则可以表达为转差的函数。但其参数是一个复杂的因式,尤其是转子的参数对转差的依赖性特别强。如转子电流的频率所突出的依赖性。如果要获得精确的控制结果,则必须认真分析这种依赖性。

图 5.2-9 画出了一台接在频率固定,供电能力很强的电网上运行的异步电动机,其定子电流和轴转矩与转速或转差的函数关系曲线。图 5.2-9 还给出了一台典型的 CPP 推进器,在零节距与满节距间运行的负载曲线。电动机总是在零节距条件下投入,这样可以充分保障驱动转矩的余量。并在尽量减小启动时间条件下,保证启动的安全和可

靠。

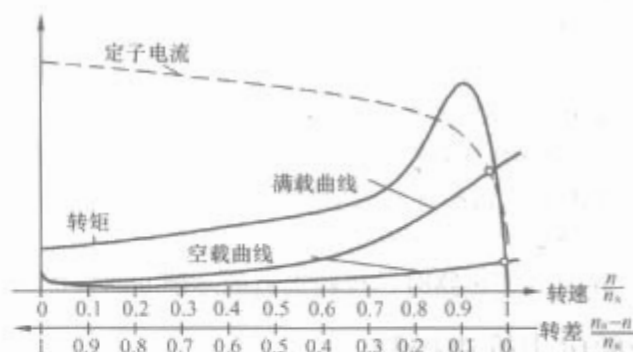


图 5.2-9 CPP 推力器中一个直接联机异步电机的带有负载曲线的负载特性

在稳定状态条件下,电动机的转速非常接近同步转速,此时转子中的感应电流与转差和轴转矩都成比例关系。一个简化的定子电流有效值表达式如下

$$I_s = \sqrt{I_m^2 + I_r^2} = \sqrt{I_{mN}^2 + I_{rN}^2 \frac{T}{T_N}} \quad (5.2-17)$$

I_m 是流过自感 L_m 的励磁电流,忽略 R_m 中的磁化损耗。 I_r 是折合到定子侧的转子电流,而 T 是转矩。下标 N 表示额定条件下的数值。当忽略定、转子中的漏感影响时,可有简化的表达式为

$$I_{mN} = I_{sN} \cos \varphi_N \quad (5.2-18)$$

$$I_{rN} = I_{sN} \sin \varphi_N \quad (5.2-19)$$

当转差达到或超出最大转矩后,前面被忽略了漏感,此时其作用已变得很重要。定子的电流最大会达 5 倍,且呈饱和状态。

因异步电机的启动电流比较大,通常情况必须加装设备以实现弱启动。典型的做法是利用一起动器,将直接启动时转子电流从标么值的 5,降到 2~3。这样做也同时减少了启动时,引起的电网电压跌落。软启动设计必须以负载特性相适应。因为这种启动方式,在原理上是在启动期间,通过降低电动机的电枢电压实现的;此时它也降低了电动机在启动时的出力。下面介绍一些常用的启动方式。

2.2.1 直接启动

用于电动机额定功率比发电容量低很多的情况。在这里,电气启动产生的瞬态过程不会超出可以接受的范围。但负载的性质应允许启动转矩的瞬态冲击。

2.2.2 星—三角或星—三角耦合

这种方法将启动电流减小到直接投入启动的 1/3 左右,但这样一来,启动转矩也相应减少了。可用来将启动时产生电力瞬态控制在允许值范围内。这种应用中,启动时负载的阻转矩必须要低到能得到可接受的加速升速。

2.2.3 自耦变压器启动

这种启动方式降低启动电流的程度,决定于自耦变压器的变比。一般来说,自耦变压器给出的变比结果,应该是网侧电流小于电动机侧电流。这种启动方式也会降低启动转矩。因此,为了保证负载启动的升速时间,也需要进行校验。

2.2.4 采用电力半导体(晶闸管)的软启动器

软启动器具有限制启动加速过程的能力,可适应各种不同的负载条件。用于启动时,减少对电网的电气瞬态冲击。由于启动转矩会正比于电机端电压的平方而衰减,因此启动参数必须要小心配置,使其能得到符合要求的启动

升速。

在起动期间，软起动器会产生相对于电源基波电压的6脉冲谐波失真。

2.3 直流电力推进控制

2.3.1 直流推进电机调速控制方式

调节推进电动机的转速可以采取下列三种方法：

- (1) 在推进电动机电枢电路内接入电阻。
- (2) 调节推进电动机励磁回路内的可变电阻来改变磁通。
- (3) 改变推进电动机电枢端电压。

推进电动机的调速方法和调速范围，不仅直接影响着控制线路，而且还影响着推进电动机本身的尺寸及其效率。因此，要求在选择推进电动机调速方法时，必须能使得推进电动机本身尺寸小、效率高，在控制上的安装、调整、使用、维修简单方便。

2.3.1.1 在推进电动机电枢电路中串联电阻调速

从电动势平衡方程式可知，直流电动机的转速方程式为 $n = (U - IR) / C_e \Phi$ (5.2-20)

式中：U 为电枢端电压；I 为电枢电流；R 为电枢电路电阻；Φ 为磁通。

在改变电枢电路电阻后，就可以得到各种不同的速度特性曲线。若推进电动机磁通为常数，则推进电动机的计算功率出现在最大转速时，从而推进电动机的体积和质量均减小，这种调速方法的优点就在于此。但是，在潜艇电力推进装置中并未得到应用，其原因是：

- (1) 调速仅能向速度减小方向进行。
- (2) 变阻器体积庞大，而且损耗大，降低了推进装置的效率。
- (3) 由于大量电能消耗在电阻上变成了热能，则水下航行时舱室生活和工作条件极其恶劣。

2.3.1.2 推进电动机励磁回路内接入可变电阻改变磁通进行调速

利用改变磁通调节推进电动机的转速也可用电动势平衡方程式来研究。该方式调速时仍近似认为推进电动机端电压不变，只改变磁通。假设电枢电路中的电压降和电枢反应忽略不计，那么可认为推进电动机转速与有效磁通成反比。这种调速方法的特点是，最小转速时磁通最大，电枢电流最小，而最大转速时则相反。使用该方法调节小范围的转速时，效率是很高的，因此潜艇上常利用它的这种优点与其他调速方法配合使用。

2.3.1.3 改变推进电动机电枢端电压进行调速

上述两种调速方法都存在着很严重的缺点。如能均匀连续的改变推进电动机电枢端电压，对解决调速问题来说是最

理想的。此时，推进电动机的转速与电压成正比例变化，既可以使转速调节均匀连续，又没有调节电阻上的损耗。

直流电动机的晶闸管全控桥传动是较为常用的改变推进电动机电枢端电压的调速控制方式。

最常使用的直流电动机是他励电动机，它的磁场绕组和电枢绕组（在转子）是分开供电的。电枢绕组中的电流通过相对于转子是静止的终端装置引入。采用电刷实现与旋转运动的换向器的电连接。实际中，电枢电流还通过定子上某些附加的绕组，为换向器上换向片间的电枢绕组电流换向提供帮助。这里，现在不讨论这种影响。

在他励直流电动机中，电枢感应的电压与磁场和转速成正比。磁场是励磁电流的函数，由于饱和的作用，实际中二者并不成比例。如果忽略饱和作用，依然能得到电枢电压表达式是

$$V_a = k \Phi I_f n \approx k K_\Phi I_f n$$
 (5.2-21)

式中：I_f 是励磁电流；n 是转速；K_Φ 和 k 是比例常数；Φ 是电动机的磁通量。

产生的扭矩与电枢的电流和磁场成正比

$$T = K I_a \Phi I_f \approx K I_a K_\Phi I_f = K_T I_a I_f$$
 (5.2-22)

由于直流电动机必须由一个电压受限制的直流电源供电，因此，励磁和电枢电流都是有界的，如图 5.2-11 所示。

将运行区域划分出一个恒转矩区。在这个区域中的特性表现为一个恒定的励磁电流以及在维持电枢电压最大条件下，电动机增加转速的弱磁区。因此，在恒转矩区域，最大转矩极限原则上是一个常量。而在弱磁区，转速与转矩成反比。

然而，在低速区，通常需限制电枢电流以避免换向器出现环火，而在高速区，必须减少电枢电流以避免换向器的片间闪弧。图 5.2-10 中表示了这些限制。

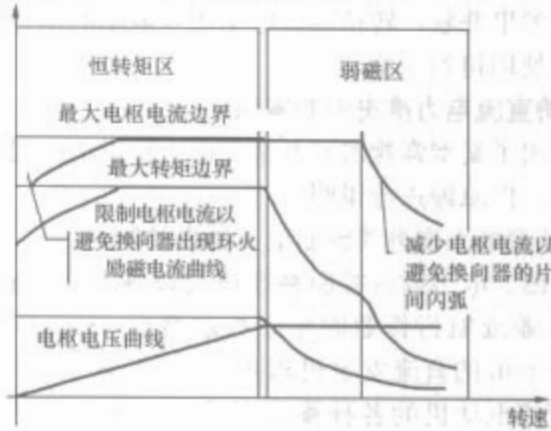


图 5.2-10 直流他励电机最大工作边界特性

通常，在大多数高功率级别的应用场合，由一个全桥式晶闸管整流器（见图 5.2-11）向直流电动机的电枢（转子绕组）提供一个可控电流。同样地，励磁绕组也由一个可调节的励磁电流来激励。倘若电枢电感很大，转矩在得到精确控

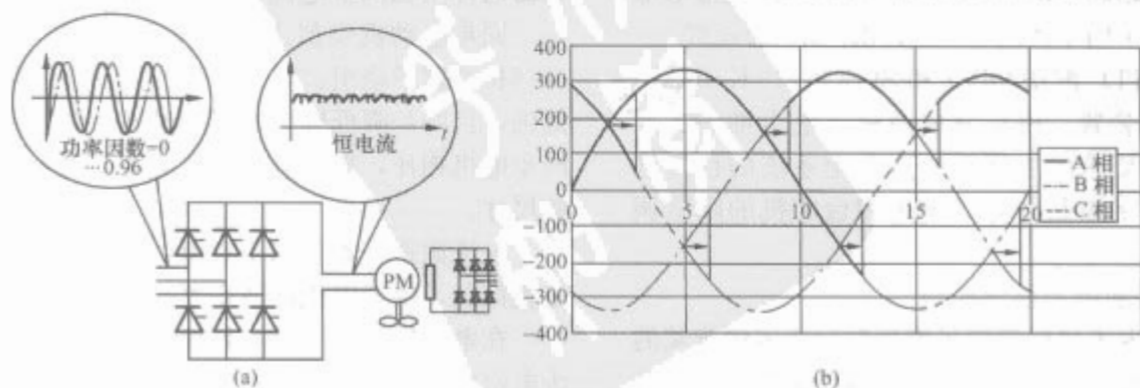


图 5.2-11 全桥式晶闸管整流器（平均电压为 $V_{dc} = 1.35 V_{ll} \cos \alpha$ ）
(a) 全桥式晶闸管整流器；(b) 电枢上的平均电压由晶闸管的导通角控制 (30°)

制的同时纹波也较低,但是由于电枢时间常数过大,带来另一方面的问题是降低了电动机的动态性能。在此类拓扑结构中,通过改变门极导通角,实现晶闸管相移式的导通间隔,实现对加在电动机电枢绕组上直流电压的控制。原理上导通角的可控制范围是 0° 至 180° ,其对应的电枢绕组电压,理论上的调节范围为 $+1,35$ 到 $-1,35$ 倍供电电压。在实际中,门导通角无论如何不允许低于 15° 电角度。为了确保电机传动的可控性,同时考虑到可能存在的电网电压降,门导通角被限制在 150° 以内的一个被称作整流范围。

由于电枢电流的受控是通过改变晶闸管门极导通角实现的,所以应该重视交流电流对基波电压的相移问题。电流的移相角度近似等于触发角。因为电枢电压与转速成比例,对移相角的一种看法是它与触发角相等,因此也认为移相角与转速及电压都近似成比例。直流电动机传动控制中,调速范围从 $0\sim 100\%$,因此功率因数变化从 $0\sim 0.96$ ($\alpha=15^{\circ}$)。偏低的功率因数不但会增加配电系统的损耗,而且对要求的负载则需要生产更多的发电功率。平均电压为 $V_{dc}=1.35V_{II}\cos\alpha$ 。

然而,在潜艇上利用蓄电池组供电时,连续调节电压,会造成蓄电池组放电不均匀,控制线路极为复杂以至于无法实现,故必须采用分级改变电压的方法。分级改变推进电动机电枢端电压的方法大致有以下几种:

- (1) 改变蓄电池组串并联。
- (2) 采用双电枢推进电动机进行双电枢的串并联。
- (3) 采用双换向器推进电动机进行双换向的串并联。
- (4) 改变两舷电机串并联调速。

2.3.1.4 推进电动机综合调速

改变电枢端电压和改变磁通一起来完成推进电动机调速的方法,称为综合调速法。一般采用三级调速来达到,即转换蓄电池组的串并联,转换推进电动机双电枢的串并联及调节磁通联合使用得到三个调速区。

2.3.2 船舶直流电力推进控制案例

下面列出了某型常规潜艇及某型电力推进消磁船组成框图,并对其工作原理进行说明。

2.3.2.1 某型电力推进消磁船电力推进控制

该型消磁、电力推进控制系统成套设备用在消磁船上,进行消磁作业或航行作业时用于控制两台 $1380\text{kW } 600\text{V}/2300\text{A } 750\text{r/min}$ 的直流发电机和两台 $1250\text{kW } 580\text{V}/2300\text{A } 500\text{r/min}$ 直流电动机的各种操作和运行。进行消磁作业时发电机控制系统对用作消磁用的两台直流发电机实施控制,完成使命要求的各种消磁脉冲电流输出。通常情况下,电力推进航行作业时,发电机控制系统和电动机控制系统同时投入运行,分别管理两台发电机和两台电动机完成使命要求的航行。

本系统主要由励磁调节部分、主回路控制设备及继电部分组成。其关键设备采用了西门子(SIEMENS)公司的S7-400可编程序控制器PLC配备OP37和SIMOREG K 6RA24系列全数字直流传动装置。PLC完成消磁或电力推进工况下的不同工作方式所要求的主回路构造和全系统的控制管理。6RA24以直接数字控制的方式满足四台电机的励磁调节方式。

2.3.2.2 某型常规潜艇电力推进控制

潜艇电力推进的根本目标是满足潜艇航行所需螺旋桨的转速和功率。该型潜艇电力推进所用蓄电池是铅酸电池,推进电机为直流双枢,他励、幅压电机。功率满足要求。直流电动机的转速方程式

$$n = (U - IR) / C_e \Phi \quad (5.2-23)$$

从上式中可以看出直流电动机的转速 n 与电枢端电压 U 成正比,和磁场 Φ 成反比。因此电动机的调速方式可以改变端电压或改变磁场或两者结合进行。

该型潜艇要求的调速比为 $1:10$,这样大的调速范围应有一些特殊的调速措施才能达到。

(1) 推进电机设计成双电枢形式,对于一组电池电压可以用双电枢的串、并联来成倍的改变电枢端电压。

(2) 蓄电池组可以实现串、并联,也可以成倍改变推进电机电枢端电压。

以上两种措施使推进电机电枢电压成倍跳跃变化,转速不会连续,因此还需将推进电机设计成他励形式,利用励磁调节器平滑改变励磁电流来平滑连接电压区间的转速。

在低转速、低功率区域,利用直流斩波形式平滑调节电枢电压达到调速目的。

将转速分成主航区和经航区两部分,在主航区是既改变端电压又改变励磁来调速。用两电池组实行串并联,和推进电机双电枢的串并联相结合,形成三个调速区,配合推进电机的励磁电流调节,转速连续可调,满足主航速要求。

用经航调节器(经航调节器设有两台,互为备用)向推进电机的单电枢供电来实现经航,主、备用励磁调节器工作时,推进电机的励磁电流固定,由经航调节器改变电枢端电压调速。满足总体要求。其操作在经航控制板前实现也可在集控室电操实现。

2.4 船舶交流电力推进控制

交流电力推进的调速控制主要靠改变推进电机的供电频率来实现。交流变频传动在工业上已使用了好几十年,但第一台使用功率半导体的变频传动设备是20世纪60年代末的事。一开始时,电力推进的控制方案大多数选择直流电动机,但到了20世纪80年代,采用交流电动机的传动,在工业上已变成了通用的方案。目前在商业市场上的竞争甚为剧烈。此后,几乎所有新交货的船舶电力推进产品,都是基于某一种交流变频传动的拓扑结构。

2.4.1 通用交流变频器类型

交流电机驱动中最通用的类型以下列顺序排列:

- (1) 电压源型逆变器,通常用于同异步电动机。
- (2) 循环(又称周波)变换器,通常用于同步电动机。
- (3) 电流源逆变器,通常用于同步电动机。

2.4.2 交流变频器控制

2.4.2.1 电流源型变换器控制

电流源变频器的特征是由晶闸管整流,并由电感滤波形成直流电流环节,也称为负载换向逆变器或同步器。这种变频器通常用在同步电机,但作某些修改后可用于异步电机。

同步电动机类似于同步发电机,带有一个转子绕组和3~6相的定子绕组。对于6相的定子绕组须由一对电流源来提供,目的是降低轴上的扭矩谐波。与功率因数接近为1的同步电机相比,异步电机的电流将会增大,因此需考虑增大的尺寸。

电流源逆变器与用于直流电机驱动的全桥晶闸管变流器是类似的,供给电机的逆变器与整流器有相同的拓扑结构。

在电机较低转速下,如低于 $5\%\sim 10\%$ 的额定转速时异步电机感应电压太低,不能执行自然的换向操作。在这个工作区域电机上的扭矩脉动比较大。因此,在推进系统设计中应仔细考虑扭矩波动及振动,以减少振动和声学噪声。

拓扑结构的特征如图 5.2-12 所示。

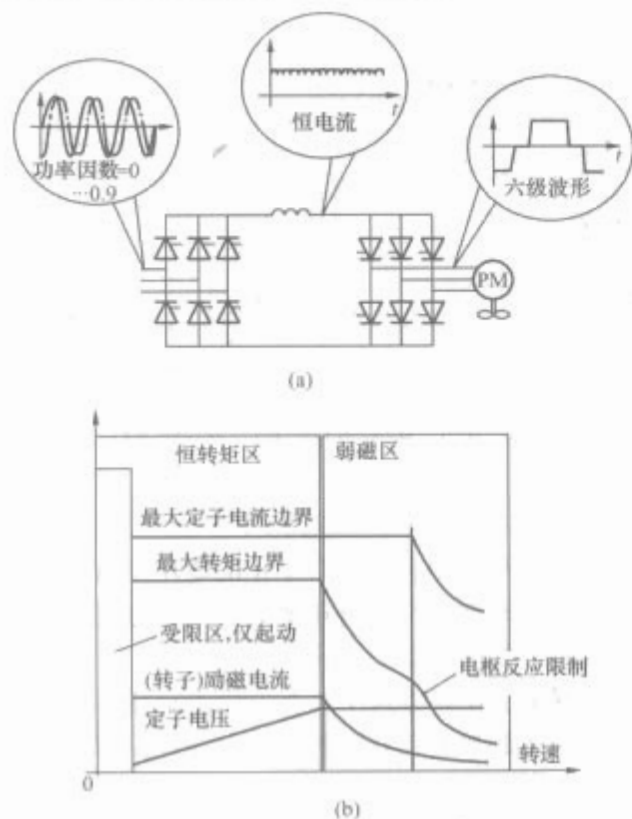


图 5.2-12 拓扑结构的特征
(a) 拓扑结构；(b) 工作边界

2.4.2.2 循环（又称周波）变流器控制

循环变流器是没有直流环节的直接变流器（见图 5.2-13）。通过控制反向并联的晶闸管，选择电源电压的相分量来构成电机交流电压。图中画出具有较小的线谐波的 12 脉冲配置，但也能给循环变流器提供 6 脉冲配置。在 6 脉冲配置中，当电源电压与逆变器电压相匹配时，可用电抗器代替馈送变压器。

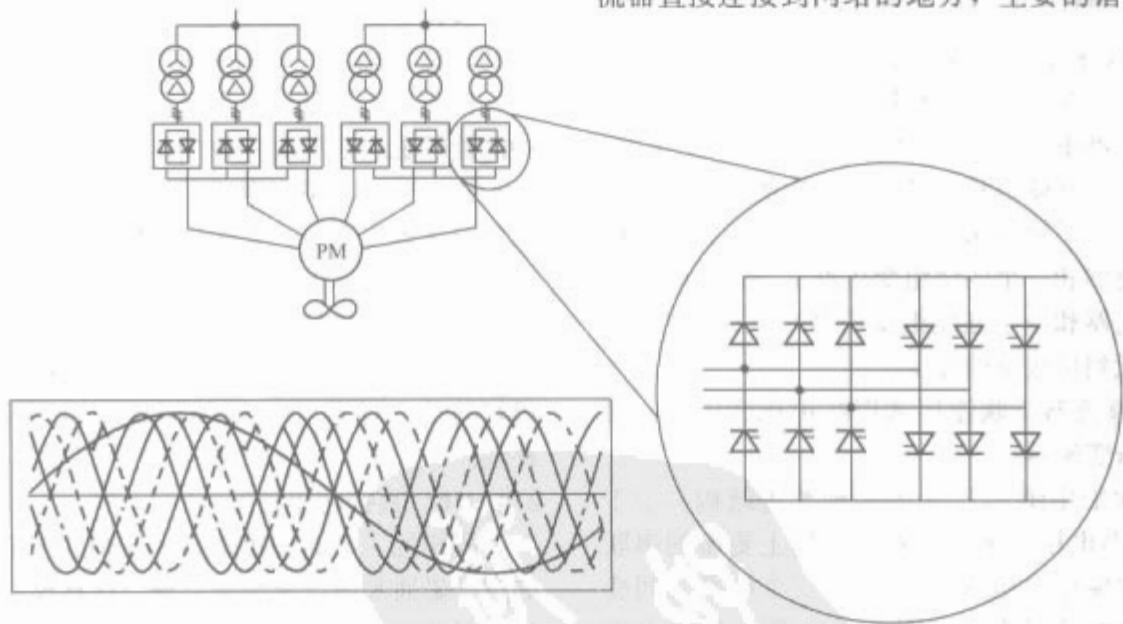


图 5.2-13 循环变流器拓扑结构及电压波形

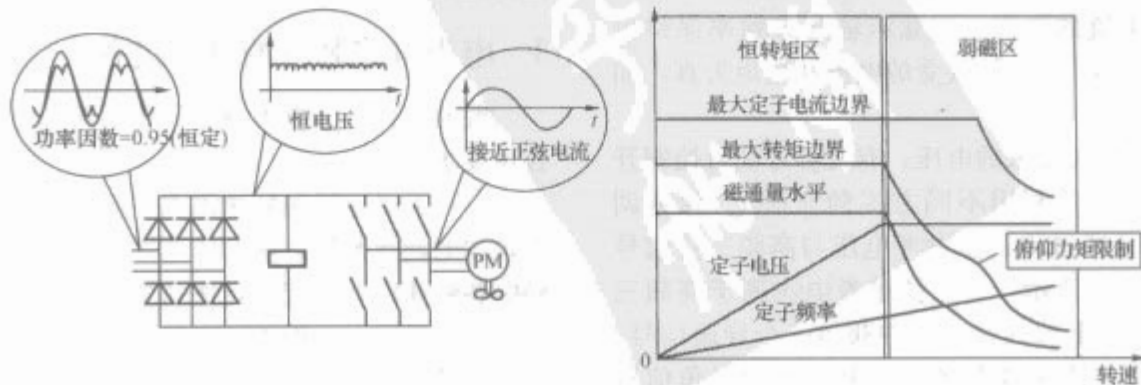


图 5.2-14 两电平 PWM 变频器拓扑结构及特征工作边界

循环变流器的频率只有约 20Hz，这在不带齿轮箱的直接驱动中应用最广泛。这种技术用于包括吊舱推进在内的主要推进系统中。

与电流源变频器相比，这种电机包含更低次谐波，并且电机的功率因数可保持较高。

电源的功率因数是与电机电压相关的，在磁场减弱区域，约为 0.76。线谐波分量是与速度相关的，当电机的功率与电网容量相比较大时，在系统设计时应仔细考虑这个因素。

其工作边界与同步电机驱动中的电流源变频器相类似。由于换向发生在网络电压而不是电机电压。因此，循环变流器更适合用在低速及对性能有要求的场合，特别是冰上制动系统或冰上运动系统，也用于动态定位及客轮中，这里对低速及操控性能都有要求。循环变流器可以应用在每个驱动电机 2~22MW 的功率范围内。

2.4.2.3 电压源型逆变器控制

电压源逆变器是目前工业上应用最广泛的一种。它具有可选择性、高精度、高性能驱动的特点，并可用于异步电机，也可用于同步电机和永磁同步电机，且优点较多。这种拓扑结构主要限制在于能否得到高功率的元器件，目前最大功率只能达到 8~10MW，但随着新的元器件的发展，这种限制范围会提高。今天，电压源逆变器可用于超过 30MW 的电机驱动中。

整流器，通常是连接到网络中的不可控二极管，它整流网络电压，因而给出相对恒定的直流电压，并由直流环节中的电容组合进一步平滑。直流环节中的电容器也确保逆变器模块中的高频开关纹波不进入网络。驱动感应电机的 6 脉冲变流器如图 5.2-14 所示。

图 5.2-14 中的整流器代表一种 6 脉冲的配置，用于变流器直接连接到网络的地方，主要的谐波电流是 5、7、11

次和13次谐波分量。当通过一种三心的变压器，利用带有双馈送的12脉冲的配置，谐波失真能进一步减少，可消除5次和7次谐波。在为了电压适配必需使用变压器的地方，通常使用12脉冲配置。利用PWM和12脉冲配制，产生的失真通常可以控制在较小的范围内，但也需要其他的方法，如滤波等。

图5.2-14的拓扑结构能使电机在两个方向运转。由于采用二极管整流电源，在制动期间，电源仅从网络得到，而不反馈给网络。而电机的逆变器部分，在制动时也将能量反馈至中间直流环节。这样直流环节电压会升高，如果没有直流保护部分可能由于过电压造成元件损坏。因此，所有的逆变器都有过电压保护功能，若直流环节电压高于某一安全极限，将接能制动电阻。

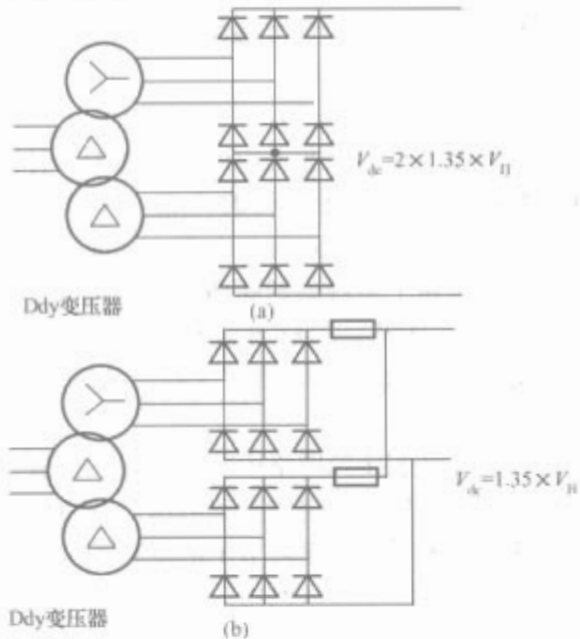


图 5.2-15 12 脉冲二极管整流拓扑结构
(a) 串联连接；(b) 并联连接

图 5.2-14 中的六脉冲变流器将在电网中产生较大的谐波，为了减少谐波，通常使用 12 脉冲配置，如图 5.2-15 所示。这可以通过变压器带有 30° 相移的二次侧（Ddy 变压器）和二 6 脉冲整流器串并联得到，产生的一次侧电流失真将大为减少。同样的，为了减少失真，也可以使用 18 脉冲配置（三个二极管整流器和一个四绕组变压器），或 24 脉冲配置（四个二极管整流器和一个五绕组变压器）。12 脉冲配置通常可以将失真降低到可接受的程度。

12 脉冲二极管整流器串联连接常用在中压变流器，而并联连接则用在低压变流器。

中压变流器通常采用图 5.2-14 的某种改进结构。由于电压的增加，DC 环节电压需要分配在逆变器上更多的串联元件上。由于现在输出电压在 +、0、- 三个电平之间变化，这就是一种三电平变流器。而图 5.2-14 所示的二电平变流器仅在 +、- 之间变化。相对于二电平变流器，三电平变流器产生更小的电流的失真。这意味着开关频率保持更低，元件上的损耗更小，以及可接受的电流和扭矩失真，如图 5.2-16 所示。

为了获得供给电机所要求的电压，有几种方式可控制开关元件。最常用的方法是利用不同方式的 PWM（脉宽调制），最基本的方法是通过将正弦参考电压与高频三角信号进行比较，如图 5.2-17 所示。当正弦参考电压高于高频三角信号时，逆变器引脚上部的开关元件获得一个导通信号，下部的开关元件关闭。当正弦参考电压低于高频三角信号时，情况正好相反。逆变器供给电机的电压遵循同样的波

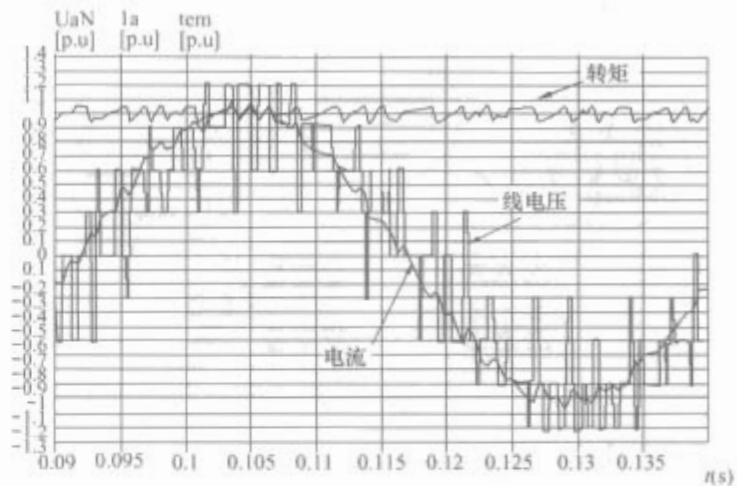


图 5.2-16 三电平逆变器线-线电压

型；正的的门控信号产生直流环节中正的电压瞬时值，负的门控信号产生直流环节中负的电压瞬时值。而电机的线电压是两相电压的差，如图 5.2-17 所示。

在可选择的 PWM 方式中，有矢量调制技术和直接转矩控制。实现电机的控制器有多种方法，这种控制器给电机提供输入以产生所要求的扭矩。

2.4.2.4 恒压频比控制

恒压频比控制是最简单且最早应用的异步电机的控制技术。过去用模拟电子电路来实现，这在早期的电机控制中是唯一的可选方法。恒压频比控制基于异步电机的稳定模型。据此，能计算相应的电压和频率，从而给出电机所要求的扭矩或速度。缺点是，该模型仅在稳定状态下是有效的，且模型参数高度依赖于温度、频率等。因此，恒压频比控制有较差的动态性能，对电机的容量有较差的可利用性。

2.4.2.5 转子磁通矢量控制

这种方法是在 20 世纪 60 年代末由德国科学家布莱克发现的。该方法基于一种模型：在旋转坐标系中，电机的电压、磁通、电流是当作矢量处理的。由于坐标系与转子绕组中的旋转磁通是同时定位的，电流矢量的分量分别为磁通分量和扭矩分量，类似直流电机中的磁场电流和电枢电流。该控制方法被发现时，要求计算机的计算能力远高于计算机的水平，因此，该方法应用于商业领域是在 20 世纪 80 年代中期的事情。矢量控制的缺点是：该模型要求做矢量变换，涉及的参数高度不稳定，特别是电机的阻抗与温度有关。为获得好的动态性能，电机的阻抗应在线匹配，或进行温度补偿。

2.4.2.6 直接转矩控制

同样的，磁通和扭矩解耦控制通过定位在坐标系中定子的定子磁通和电流模型来完成。这种模型与高度变化的转子参数无关，但要求控制器有高得多的计算能力。该方法称为直接扭矩控制，在市场上已有产品了。

3 电力推进装置的过渡过程

舰船总体及装置本身的设备对船舶电力推进装置提出了各种要求，如：

(1) 为适应船舶航速需求，船舶电力推进装置一般应具有较宽的调速范围，在调速范围内转速能连续可调，而且应确保各航速区所规定的转速和功率等。

(2) 船舶电力推进装置的输出特性必须在整个调速范围内与螺旋桨负载特性相适应，确保电力推进装置的稳定运行。

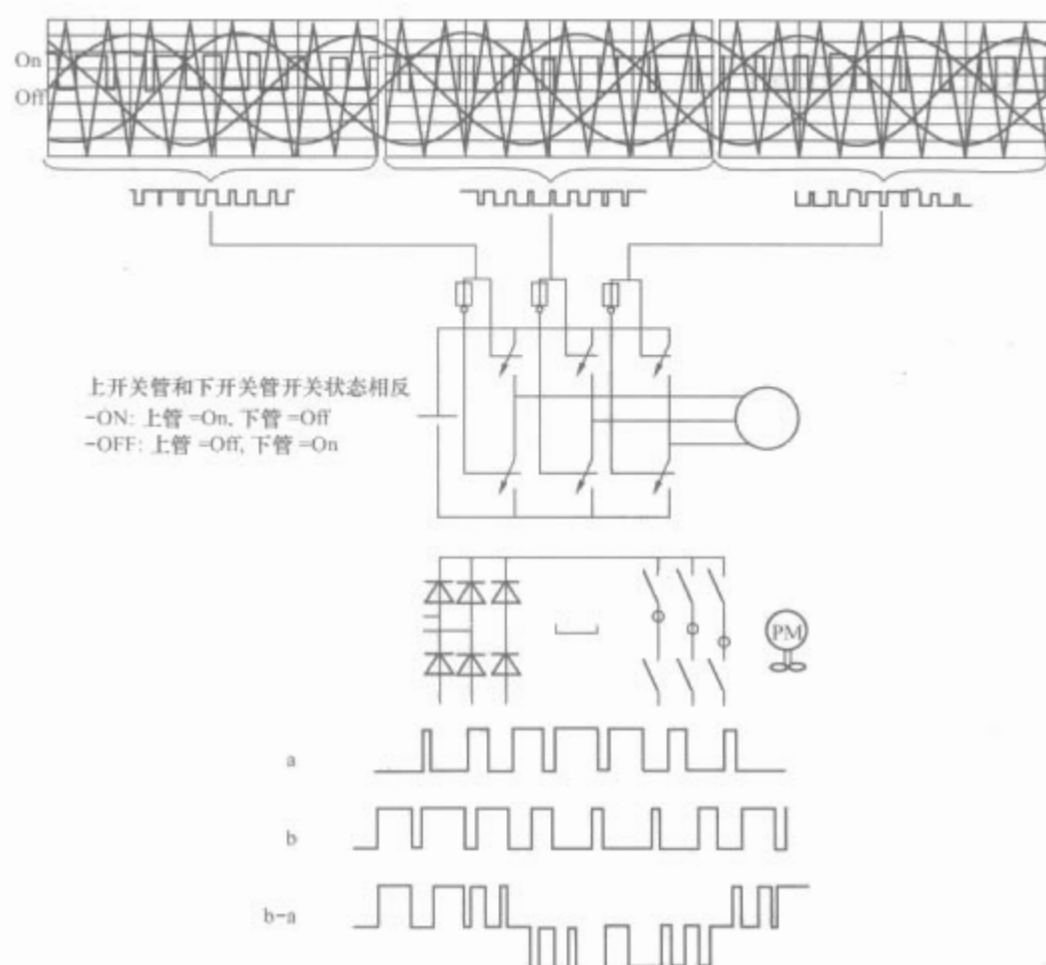


图 5.2-17 PWM 逆变器触发信号产生方式及输出电压波形

(3) 为保证一定的船舶机动性能, 必须对船舶电力推进装置的过渡过程时间提出要求。

(4) 对船舶电力推进装置来说, 一般要限制其起动、制动和反过程中的电流不超过额定电流的某一倍数。

为满足上述提出的各种要求, 必须研究电力推进装置过渡过程的规律, 也即认识和掌握电力推进装置各参数对时间的变化规律, 如转速、转矩及电流等变量随时间的变化规律, 从而正确选择及合理使用电力推进装置, 以求提高装置的性能。

一般说来, 船舶电力推进装置的过渡过程按转速变化性质可分为起动、调速及反转等过程。

3.1 研究电力推进装置过渡过程的方法

电力推进装置的运动规律是建立在经典动力学理论基础上, 通过研究其运动方程掌握各参量的变化规律。一般来说研究方法可分为两类:

(1) 解析方法。通过对电力推进装置各环节物理规律的分析, 建立微分方程组来描述电力推进装置的运动规律; 然后用数学方法求解, 找出各环节的参数变化规律, 讨论它们对过渡过程的影响, 从而得出普遍的结论。这种方法比较简明, 比较适合于线性系统的分析。

(2) 仿真方法。这种方法是在计算机的辅助下对电力推进装置的过渡过程进行分析, 又称计算机模拟方法。由于计算机对高阶微分方程、变系数、非线性等问题通过数值求解很容易得出结果, 因此, 此方法在很多领域获得广泛应用。本节也将主要利用计算机辅助仿真进行电力推进装置过渡过程的分析与计算。

3.2 电力推进装置的数学模型

电力推进装置的数学模型一般可用微分方程、传递函数以及状态方程表示。通常用状态方程描述的数学模型在电力

推进装置的数字仿真分析使用起来更方便, 因此本节只建立电力推进装置以状态方程形式描述的数学模型, 对其他形式描述的数学模型作相应推导便可获得。

3.2.1 直流电力推进装置的数学模型

对船舶直流电力推进装置来说, 通常采用他励直流电动机。因此, 本小节关于直流电力推进装置过渡过程的分析与计算也主要是针对他励直流电动机, 对于其他类型的直流电动机可作相应修改后运用。

3.2.1.1 假定条件

为简化分析, 在研究他励直流电动机的机电过渡过程时, 通常作如下假定:

- (1) 忽略磁路饱和的影响, 假定磁路线性。
- (2) 假定主极磁通恒定, 不随电枢电流变化, 不考虑涡流和磁滞效应。

3.2.1.2 直流电力推进装置的状态方程

图 5.2-18 为他励直流电机的等效电路。对直流电力推进装置来说, 一般选取直流推进电机的电枢电流 i_a 、励磁电流 i_f 和转子机械角速度 ω 作为状态变量。在上述假定条件下, 直流电力推进装置的状态方程可表示为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (5.2-24)$$

其中

$\mathbf{X} = [i_a \quad i_f \quad \omega]^T$ 为状态变量;

$\mathbf{U} = [U_a \quad U_f \quad -T_L]^T$ 为输入控制量;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & 0 & -C_T\Phi/L_a \\ 0 & -R_f/L_f & 0 \\ C_T\Phi/J & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ 为状态矩阵;}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1/L_a & 0 & 0 \\ 0 & -R_f/L_f & 0 \\ 0 & 0 & 1/J \end{bmatrix} \text{ 为控制矩阵。}$$

式中: i_a 为推进电机电枢绕组电流; i_f 为推进电机励磁绕组电流; ω 为推进电机的角速度; U_a 为加在推进电机电枢绕组上的电压; U_f 为加在推进电机励磁绕组上的电压; T_L 为折算到推进电机轴上的负载转矩(一般由螺旋桨负载特性曲线确定); L_a 、 R_a 为推进电机电枢回路的总电感和总电阻; L_f 、 R_f 为推进电机励磁回路的电感和电阻; $C_T\Phi$ 为推进电机转矩常数与每极气隙磁通的乘积; J 为直流电力推进装置轴系的总转动惯量; C_T 为推进电机转矩常数; Φ 为推进电机每极气隙磁通。

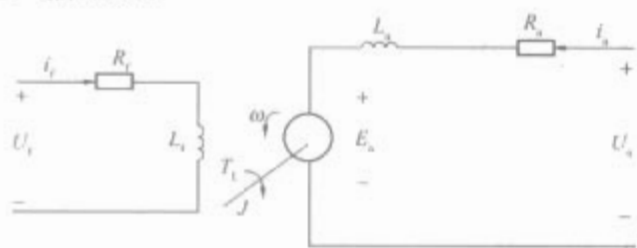


图 5.2-18 他励直流推进电机的等效电路

在某些直流电力推进装置中通常先调节好推进电机的励磁电流并保持不变,则推进装置的状态方程可简化为

$$\dot{X}' = A'X' + B'U' \quad (5.2-25)$$

式中: $X' = [i_a \quad \omega]^T$ 为简化的状态变量;

$U' = [U_a \quad -T_L]^T$ 为简化的输入控制量;

$A' = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & -C_T\Phi/L_a \\ C_T\Phi/J & 0 \end{bmatrix}$ 为简化的状态矩阵;

$B' = \begin{bmatrix} 1/L_a \\ 1/J \end{bmatrix}$ 为简化的控制矩阵。

3.2.2 交流电力推进装置的数学模型

对船舶交流电力推进装置来说,采用的推进电机一般有同步电动机、异步电动机及永磁电动机等。由于不同类型交流电动机建模思路基本相同,为节约篇幅,本小节主要以异步电动机为例,对于其他类型的交流推进电机可作相应修改后运用。现代船舶大功率交流推进电机一般采用多相电机,本节以五相异步推进电机为例进行船舶交流电力推进装置的建模。

3.2.2.1 假定条件

为简化分析,在研究异步电动机的机电过渡过程时,通常作如下假定:

- (1) 电机定子、转子各相绕组在空间对称分布。
- (2) 电机定、转子表面光滑,无齿槽效应。
- (3) 气隙磁场沿定子圆周为正弦分布,忽略磁场高次谐波的作用。

(4) 忽略电机铁磁材料的饱和、磁滞和涡流等影响,集肤效应也不考虑。

(5) 不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响。

3.2.2.2 交流电力推进装置的状态方程

(1) 自然坐标系下的五相异步电机数学模型。五相异步电机原理图如图 5.2-19 所示。转子绕组可以等效为与定子绕组具有相同极数和相数的等效绕组。定子 5 相绕组的轴线 A、B、C、D、E 在空间是固定的,转子绕组的轴线 a、b、c、d、e 随转子旋转。以定子 A 相轴线为参考坐标轴,转子 a 相轴线与定子 A 相轴线间的电角度 θ_r 为空间角位移变量。

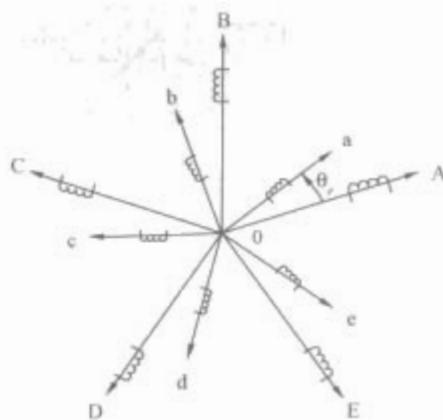


图 5.2-19 五相异步电机原理图

在上述假设条件下,规定各绕组电压、电流、磁链的正方向符合电动机惯例和右手螺旋定则,且设转子侧各变量如电压、电流、磁链、电阻及漏感均已折算到定子侧,可得五相异步电机在自然坐标系下的数学模型。

1) 磁链方程

$$\begin{bmatrix} \Psi_{abcedes} \\ \Psi_{abcedr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcedes} \\ I_{abcedr} \end{bmatrix} \quad (5.2-26)$$

式中: $\Psi_{abcedes} = [\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_D, \psi_E]^T$, 为自然坐标系下定子绕组磁链向量; $\Psi_{abcedr} = [\psi_a, \psi_b, \psi_c, \psi_d, \psi_e]^T$, 为自然坐标系下转子绕组磁链向量; $I_{abcedes} = [i_A, i_B, i_C, i_D, i_E]^T$, 为自然坐标系下定子相电流向量; $I_{abcedr} = [i_a, i_b, i_c, i_d, i_e]^T$, 为自然坐标系下转子相电流向量; L_{ss} 为自然坐标系下定子自感矩阵; L_{rr} 为自然坐标系下转子自感矩阵; $L_{sr} = [L_{rs}]^T$, 为自然坐标系下定转子间的互感矩阵。

2) 电压方程

$$\begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + d/dt \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} \quad (5.2-27)$$

式中: $U_s = [u_A, u_B, u_C, u_D, u_E]^T$, 为自然坐标系下定子相电压向量; $U_r = [0, 0, 0, 0, 0]^T$, 为自然坐标系下转子相电压向量; $R_s = r_s \times E_s$, 为自然坐标系下定子电阻矩阵; $R_r = r_r \times E_r$, 为自然坐标系下转子电阻矩阵; r_s 为定子相绕组电阻; r_r 为转子相绕组电阻; d/dt 为微分算子。

3) 运动方程。把摩擦阻力矩也归并到负载阻力矩中,电机的运动方程可写为

$$\frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L \quad (5.2-28)$$

式中: T_L 为负载阻力矩; J 为电机及负载系统的转动惯量。

(2) 广义坐标变换。由式 (5.2-17) ~ 式 (5.2-18) 可知,由于定、转子互感矩阵中的元素与转子位置角 θ_r 有关,自然坐标系下五相异步电机的微分方程系数是时变的,难于进行数字分析,需简化。为此,分别定义定、转子的广义坐标变换矩阵,如下

$$T = \begin{bmatrix} T_s & 0 \\ 0 & T_r \end{bmatrix} \quad (5.2-29)$$

其中

$$T_s = \sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{5}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{5}) & \cos(\theta_s - \frac{6\pi}{5}) & \cos(\theta_s - \frac{8\pi}{5}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{5}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{5}) & -\sin(\theta_s - \frac{6\pi}{5}) & -\sin(\theta_s - \frac{8\pi}{5}) \\ \cos 3(\theta_s) & \cos 3(\theta_s - \frac{2\pi}{5}) & \cos 3(\theta_s - \frac{4\pi}{5}) & \cos 3(\theta_s - \frac{6\pi}{5}) & \cos 3(\theta_s - \frac{8\pi}{5}) \\ -\sin 3(\theta_s) & -\sin 3(\theta_s - \frac{2\pi}{5}) & -\sin 3(\theta_s - \frac{4\pi}{5}) & -\sin 3(\theta_s - \frac{6\pi}{5}) & -\sin 3(\theta_s - \frac{8\pi}{5}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$T_r = \sqrt{\frac{2}{5}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s - \theta_r) & \cos(\theta_s - \theta_r - \frac{2\pi}{5}) & \cos(\theta_s - \theta_r - \frac{4\pi}{5}) & \cos(\theta_s - \theta_r - \frac{6\pi}{5}) & \cos(\theta_s - \theta_r - \frac{8\pi}{5}) \\ -\sin(\theta_s - \theta_r) & -\sin(\theta_s - \theta_r - \frac{2\pi}{5}) & -\sin(\theta_s - \theta_r - \frac{4\pi}{5}) & -\sin(\theta_s - \theta_r - \frac{6\pi}{5}) & -\sin(\theta_s - \theta_r - \frac{8\pi}{5}) \\ \cos 3(\theta_s - \theta_r) & \cos 3(\theta_s - \theta_r - \frac{2\pi}{5}) & \cos 3(\theta_s - \theta_r - \frac{4\pi}{5}) & \cos 3(\theta_s - \theta_r - \frac{6\pi}{5}) & \cos 3(\theta_s - \theta_r - \frac{8\pi}{5}) \\ -\sin 3(\theta_s - \theta_r) & -\sin 3(\theta_s - \theta_r - \frac{2\pi}{5}) & -\sin 3(\theta_s - \theta_r - \frac{4\pi}{5}) & -\sin 3(\theta_s - \theta_r - \frac{6\pi}{5}) & -\sin 3(\theta_s - \theta_r - \frac{8\pi}{5}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

式中: θ_s 为以定子 A 相绕组轴线为参考轴的旋转坐标系位置电角度; θ_r 为以定子 A 相绕组轴线为参考轴的转子位置电角度。

(3) 同步坐标系下的五相异步电机数学模型。

1) 磁链方程

$$\begin{bmatrix} \psi_{dqz1z3s} \\ \psi_{dqz1z3r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_s & 0 \\ 0 & T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{abcde} \\ \psi_{hbcdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dqz1z3s} \\ I_{dqz1z3r} \end{bmatrix}$$

式中: $\psi_{dqz1z3s} = [\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{z1s}, \psi_{z3s}, \psi_{0s}]^T$, 为同步坐标系下定子磁链向量; $\psi_{dqz1z3r} = [\psi_{dr}, \psi_{qr}, \psi_{z1r}, \psi_{z3r}, \psi_{0r}]^T$, 为同步坐标系下转子磁链向量; $I_{dqz1z3s} = [i_{ds}, i_{qs}, i_{z1s}, i_{z3s}, i_{0s}]^T$, 为同步坐标系下定子相电流向量; $I_{dqz1z3r} = [i_{dr}, i_{qr}, i_{z1r}, i_{z3r}, i_{0r}]^T$, 为同步坐标系下转子相电流向量;

L_{11} 为同步坐标系下子自感矩阵; L_{22} 为同步坐标系下转子自感矩阵; L_{12} 、 L_{21} 为同步坐标系下转子间的互感矩阵。

2) 电压方程

$$\begin{bmatrix} U_{dqz1z3s} \\ U_{dqz1z3r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dqz1z3s} \\ I_{dqz1z3r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_s \cdot p(T_s^{-1}) & 0 \\ 0 & T_r(T_r^{-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{dqz1z3s} \\ \psi_{dqz1z3r} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \psi_{dqz1z3s} \\ \psi_{dqz1z3r} \end{bmatrix} \quad (5.2-30)$$

其中: $U_{dqz1z3s} = [u_{ds}, u_{qs}, u_{z1s}, u_{z3s}, u_{0s}]^T$, 为同步坐标系下定子相电压向量

$U_{dqz1z3r} = [u_{dr}, u_{qr}, u_{z1r}, u_{z3r}, u_{0r}]^T$, 为同步坐标系下转子相电压向量

$$T_s \cdot p(T_s^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_1 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3\omega_1 & 0 \\ 0 & 0 & 3\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_r \cdot p(T_r^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_1 - \omega_r) & 0 & 0 & 0 \\ (\omega_1 - \omega_r) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3(\omega_1 - \omega_r) & 0 \\ 0 & 0 & 3(\omega_1 - \omega_r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中: ω_1 为同步坐标系的旋转角速度; ω_r 为电机转子的旋转角速度。

3.3 电力推进装置状态方程的数值解法

综上, 电力推进装置的过渡过程求解问题的一般提法为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ X(t_0) = X_0 \end{cases} \quad (5.2-31)$$

因系统矩阵 A 和控制矩阵 B 为状态变量 X 的函数, 故式 (5.2-24) 是一个非线性微分方程组, 难以用解析方法求解, 一般用数值方法求解。

常用的非线性微分方程组的数值积分法主要有欧拉法和龙格-库塔法两种。欧拉法精度较低, 应用日渐减少; 龙格-库塔法的低阶格式由于同样的原因也较少应用。相比之下, 四阶龙格-库塔法计算精度高、稳定性好、计算量适中, 在工程中有比较广泛的应用。下面结合式 (5.2-32) 简要介绍四阶龙格-库塔算法。

为表述方便, 定义矩阵函数

$$F(t, X) = A(X)X(t) + B(X)U(t) \quad (5.2-32)$$

则式 (5.2-32) 应用四阶龙格-库塔算法求解的过程为 (h 为时间步长):

1) 状态变量赋初值 $X(t_0) = X_0$

2) 对时间序列 $t_i = t_0 + ih$ ($i = 0, 1, 2, \dots$) 循环做

$$k_1 = F[t_i, X(t_i)]$$

$$k_2 = F[t_i + h/2, X(t_i) + k_1 h/2]$$

$$k_3 = F[t_i + h/2, X(t_i) + k_2 h/2]$$

$$k_4 = F[t_i + h, X(t_i) + hk_3]$$

$$X(t_{i+1}) = X(t_i) + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)h/6$$

直至大于 t_i 或等于给定时刻 t_T 或满足其他预定中止条件为止。

上述算法的实现既可以自己编程, 又可以利用现有的成熟软件包, 如 MATLAB 仿真工具等。本节对船舶电力推进装置过渡过程的分析采用 MATLAB 仿真分析软件。

3.4 电力推进装置过渡过程的分析与计算举例

研究船舶电力推进装置过渡过程方法主要有解析方法和仿真方法两种。从寻求船舶电力推进装置各环节的参数变化规律, 讨论它们对船舶电力推进装置过渡过程的影响, 从而得出普遍结论的角度讲, 解析法更合适。但对含螺旋桨非线性负载的船舶电力推进装置来说, 要想通过解析方法获得电力推进装置各变量随负载变化的显式解, 是相当困难的。从另一方面讲, 仿真计算方法对变系数、非线性等问题通过数值求解却很容易得出结果, 因此本节将主要采用仿真方法进行电力推进装置过渡过程的分析与计算。

由直流推进电机的调速公式 $n = (U - I_s R) / (C_E \Phi)$ 可

知,船舶直流电力推进装置实现调速的方式有调压调速、调励磁调速及调电枢电阻调速三种。不同调速过程中,控制环节的作用要么是使推进电机电枢电流迅速达到最大调节电流,要么是使推进电机励磁电流迅速达到最大调节电流,从而提高系统的快速性,并确保系统稳定运行、稳态无误差。为分析简便,本节在对船舶直流电力推进装置过渡过程的分析中均假定电力推进装置由于其控制环节的快速调节作用,在调节电枢电压时励磁电流保持某一恒定值不变,而在调节励磁电流时电枢电压保持某一恒定值不变,从而将问题考虑的重点放在研究过渡过程中推进电机电枢电流、电磁转矩和转速等变量随负载特性变化而变化的规律。

3.4.1 某船舶直流电力推进装置的计算参数

额定电枢电压: $U_{an} = 320\text{V}$ 。
电枢回路总电阻: $R_{a(15^{\circ}\text{C})} = 0.026\,42\Omega$ 。
励磁绕组电阻: $R_{f(15^{\circ}\text{C})} = 4.838\,7\Omega$ 。
电枢绕组电感: $L_{a(\text{饱和})} = 0.1\text{mH}$ 。
励磁绕组电感: $L_f = 15\text{H}$ 。
电机转矩常数与气隙磁通乘积: $C_M\Phi = 50.032\,2$ 。
轴系转动惯量: $J \approx 20\,500\,\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。
螺旋桨负载特性曲线如表 5.2-2 所示。

表 5.2-2 螺旋桨负载特性曲线											
n (r/min)	45	67	88	100	140	180	240	320	360	400	432
T_L/η (N·m)	444	872	1364	1694	3120	4830	8760	14\,668	18\,666	22\,500	26\,052

分级切除电阻启动时,各级电阻阻值:
 $R_1 = 0.402\,8(\Omega)$, $R_2 = 0.164\,4(\Omega)$, $R_3 = 0.067\,2(\Omega)$

3.4.2 直流电力推进装置过渡过程的边界条件

要唯一确定船舶电力推进装置状态变量的动态过程,除了要确定装置的状态方程以及相应参数外,影响装置过渡过程的边界条件也必须明确。下面分别简介研究过渡过程所需的初始条件和端口约束条件。

(1) 直流电力推进装置启动过程的边界条件。

1) 初始条件。不同启动方式下直流电力推进装置启动过程中状态变量的初始条件见表 5.2-3。

表 5.2-3 初始条件		
方式	串电阻分级 启动过程	调电枢电压 启动过程
初始值		
i_a	0	0
i_f	i_{fn}	i_{fn}
ω	0	0

2) 端口约束条件。不同启动方式下直流电力推进装置启动过程中电端口和机械端口的约束条件见表 5.2-4。

表 5.2-4 约束条件		
方式	串电阻分级 启动过程	调电枢电压 启动过程
初始值		
U_a	U_{an}	$U_{a0} \sim U_{an}$
U_f	U_{fn}	U_{fn}
T_L	由螺旋桨负载特性曲线确定	

(2) 直流电力推进装置反转过程的边界条件。

1) 初始条件。不同方式下直流电力推进装置反转过程中状态变量的初始条件见表 5.2-5。

表 5.2-5 初始条件		
方式	调节励磁电流 反转过程	调电枢电压 反转过程
初始值		
i_a	i_{a0}	i_{a0}
i_f	i_{fn}	i_{fn}
ω	ω_0	ω_0

2) 端口约束条件。不同方式下直流电力推进装置反转过程中电端口和机械端口的约束条件见表 5.2-6。

表 5.2-6 约束条件		
方式	调节励磁电流 反转过程	调电枢电压 反转过程
初始值		
U_a	U_{an}	$U_{an} \sim -U_{an}$
U_f	$U_{fn} \sim -U_{fn}$	U_{fn}
T_L	由螺旋桨负载特性曲线确定	

(3) 直流电力推进装置调速过程的边界条件。

1) 初始条件。不同方式下直流电力推进装置调速过程中状态变量的初始条件见表 5.2-7。

表 5.2-7 初始条件		
方式	调节励磁电流 调速过程	调电枢电压 调速过程
初始值		
$i_a(\text{A})$	i_{a0}	i_{a0}
$i_f(\text{A})$	i_{fn}	i_{fn}
$\omega(\text{rad/s})$	ω_0	ω_0

2) 端口约束条件。不同方式下直流电力推进装置调速过程中电端口和机械端口的约束条件见表 5.2-8。

表 5.2-8 约束条件		
方式	调节励磁电流 调速过程	调电枢电压 调速过程
初始值		
$U_a(\text{V})$	$U_{a0} \sim U_{an}$	$U_{a0} \sim U_{an}$ 、 $U_{an} \sim -U_{an}$
$U_f(\text{V})$	$U_{fn} \sim U_{fl}$	U_{fn}
$T(\text{N}\cdot\text{m})$	由螺旋桨负载特性曲线确定	

3.4.3 某船舶直流电力推进装置过渡过程的仿真计算与分析

根据建立的船舶直流电力推进装置的状态方程,代入所需的参数和边界条件,借助相关的仿真软件,就可进行直流电力推进装置过渡过程的仿真计算。

(1) 直流电力推进装置启动过程的仿真计算与分析。船舶直流电力推进装置启动方式有调电枢电压启动和电枢回路串电阻分级启动两种。对中高端区域启动,一般采取分级电阻启动;而对低速区域启动,则采取调电枢电压启动。

对船舶直流电力推进装置来说,在启动推进电机之前,应先接通各种控制电路、保护电路、励磁电路和主电路。然后通过控制环节的作用使推进电机励磁电流迅速达到最大调节电流,之后就可以通过分级切除电阻或调节电枢电压启动推进电机。

1) 仿真波形。

a. 分级切除电阻起动过程仿真波形。保持电枢电压和励磁电流恒定, 分级切除电阻起动推进电机, 起动过程中转速和电枢电流波形如图 5.2-20。

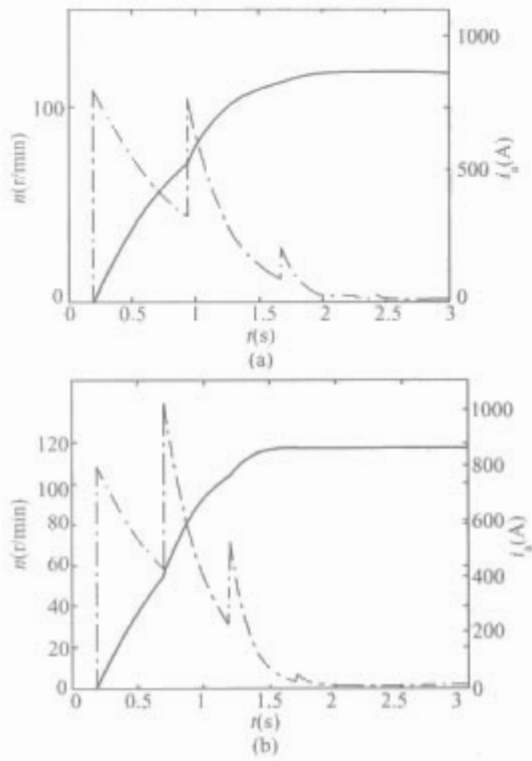


图 5.2-20 分级切除电阻起动过程波形图
(a) 每级电阻切除时间 0.735s; (b) 每级电阻切除时间 0.5s

b. 调节电枢电压起动过程仿真波形。保持励磁电流和电枢回路电阻恒定, 调节电枢电压起动推进电机, 起动过程中转速和电枢电流波形如图 5.2-21。

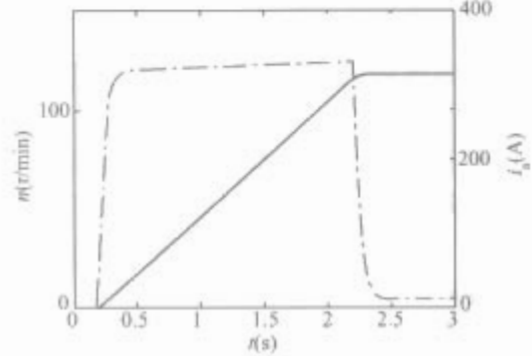


图 5.2-21 调节电枢电压起动过程流波形图

2) 仿真结果分析。由图 5.2-20、图 5.2-21 可以看出, 在给定条件下, 通过分级切除电阻和调节电枢电压均能使推进电机平稳起动。但通过分级切除电阻起动电机时电枢电流在切除电枢回路电阻的瞬间有较大的冲击值, 特别是前两次电机转速较低时; 而且起动过程中转矩波动较大导致电机加速不均衡。而采用调节电枢电压起动电机, 在加速过程中, 推进电机以相对较大的电枢电流比较平稳地运行, 加速过程完毕, 电枢电流很快降至较小的稳态值; 而且起动过程中转矩比较平稳, 电机加速比较均衡。

针对分级切除电阻起动推进电机过程中 (包括反转) 会出现较大的冲击电流, 在船舶直流电力推进装置的设计过程中, 一方面, 既要考虑采取合理的起动电阻值限制冲击电流, 另一方面, 更要采取合理的保护措施, 确保装置可靠运行。

虽然, 调节电枢电压起动电机比分级切除电阻起动电机起动性能要好一些, 但是实现大范围电枢电压的线性连续调节相对分级切除电阻要困难得多。因此, 调节电枢电压起动包括调速、反转等只在小功率直流电力推进装置或大功率直流电力推进装置的低速区应用较广。

由图 5.2-20 和图 5.2-21 可以看出, 在其他条件相同情况下, 当分级电阻的切除时间减少, 有可能导致电枢电流的第二次冲击值超过第一次冲击值, 实际中不允许出现此现象。因此, 实际中必须合理选择各级电阻的切除时间。

(2) 直流电力推进装置反过程的仿真计算与分析。船舶直流电力推进装置反转方法一般有调电枢电压反转和调励磁电流反转两种。

对采用他励直流推进电机的船舶直流电力推进装置来说, 当采取调节励磁电流使推进电机反转方式时, 为防止电机失磁而导致飞车, 不允许带电使励磁反向。通常采取断开电枢回路后再使励磁电流反向达到额定值的做法。当采取调节电枢电压使推进电机反转方式时, 则可直接带电反向。

此外, 为防止反转过程中电枢电流超过某一范围, 通常采取限制反转时电机初始转速不超过某一转速限值的方法。在此限制措施下, 就可以通过调节电枢电压或调节励磁电流使推进电机反转。

1) 仿真波形。

a. 调节励磁电流反转过程仿真波形。保持电枢电压恒定, 励磁电流反向后也保持恒定, 分级切除电阻使推进电机由正转逐渐反转。反转过程中转速、电枢电流和电磁转矩波形如图 5.2-22 和图 5.2-23。

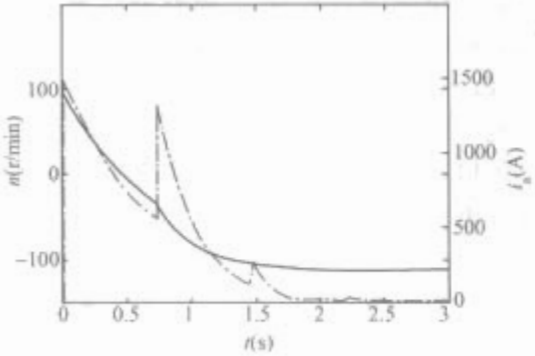


图 5.2-22 调节励磁电流反转过程波形图
(初始转速 100r/min)

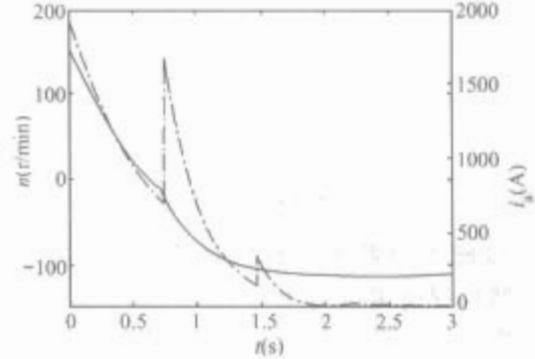


图 5.2-23 调节励磁电流反转过程波形图
(初始转速 160r/min)

b. 调节电枢电压反转过程仿真波形。保持励磁电流和电枢回路电阻恒定, 调节电枢电压使推进电机反转, 反转过程中转速和电枢电流波形如图 5.2-24。

2) 仿真结果分析。由图 5.2-22~图 5.2-24 可以看出, 调节电枢电压、调节励磁电流并采取分级切除电阻使推进电机反转类似于起动过程, 两种方式都能使推进电机顺利反转。只是调节励磁电流并采取分级切除电阻使推进电机反转的过程比较复杂, 对他励直流电机来说, 不能带电调励磁使电机反转。

由图 5.2-22 和图 5.2-23 可以看出, 在其他条件相同情况下, 当反转初始转速较高时, 有可能导致电枢电流的第一次冲击值超过某一限值 (如本例中的 1500A), 实际中不允许出现此现象。因此, 实际中必须选择合理的反转初始

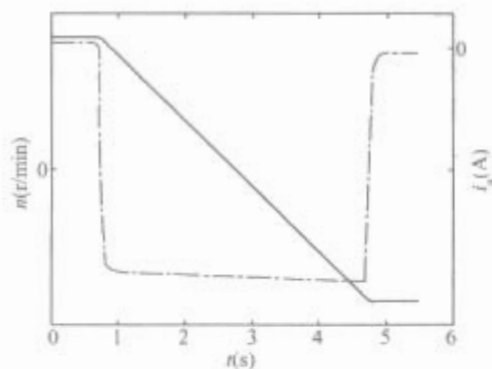


图 5.2-24 调节电枢电压反转过程波形图

转速。

(3) 直流电力推进装置调速过程的仿真计算与分析。船舶直流电力推进装置实现调速的方式有调电枢电压调速、调励磁电流调速及调电枢回路电阻调速三种。电枢回路电阻由于连续调节不是很方便,通常情况下较少用,而常用调电枢电压和调励磁电流调速。两种方法既可以单独作用,又可以配合作用以扩大调速范围。

同样在进行直流电力推进装置调速之前,应先接通各种控制电路、保护电路、励磁电路和主电路。然后通过控制环节的作用使推进电机励磁电流迅速达到最大调节电流并保持恒定(针对调电枢电压方式),之后就可以通过调节电枢电压或调节励磁电流进行推进电机的调速。

1) 仿真波形。

a. 调节电枢电压调速过程仿真波形。保持励磁电流和电枢回路电阻恒定,调节电枢电压进行推进电机调速,调速过程中转速和电枢电流波形如图 5.2-25。

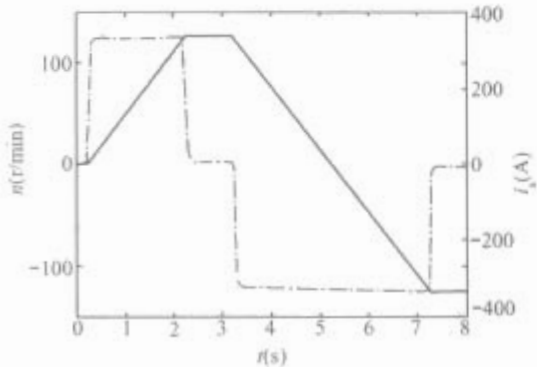


图 5.2-25 调节电枢电压调速过程波形图

b. 调节励磁电流调速过程仿真波形。先将电机起动到某一转速,然后保持电枢电压和电枢回路电阻恒定,调节励磁电流进行推进电机调速,调速过程中转速和电枢电流波形如图 5.2-26。

2) 仿真结果分析。由图 5.2-25 和图 5.2-26 可以看出,调节电枢电压和调节励磁电流都能使推进电机转速发生变化。对他励直流电机来说,采用调节电枢电压进行调速,整个调速过程中各变量的稳定性、快速性及准确度等指标都比较优良。而采用调节励磁电流进行推进电机调速时,由于电

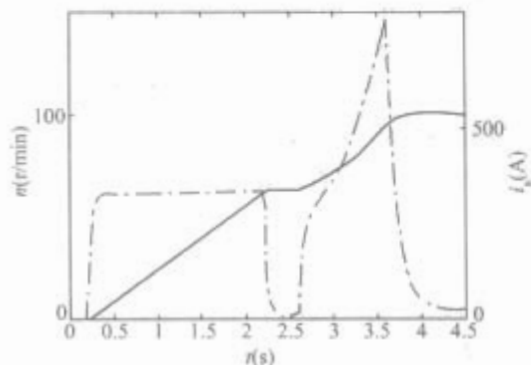


图 5.2-26 调节励磁电流调速过程波形图

枢电流及电磁转矩的波动较大,一般只在较高速区域配合调压调速进行弱磁升速,以便拓宽整个直流电力推进装置的调速范围。

4 船舶电力推进的安全性与保护

4.1 电力推进系统安全性设计

4.1.1 一般要求

应在考察系统设计所用的有关标准、规范、条例、设计手册和其他设计指南资料后,确定系统安全性设计要求。一般的系统安全性设计要求如下:

(1) 通过设计(包括器材选择和代用)消除已判定的危险或减少有关的风险。当必须使用有潜在危险的器材时,应选择系统寿命周期内风险最小者。

(2) 危险的物质、零部件和操作应与其他活动、区域、人员及不相容的器材隔离。

(3) 设备的位置安排应使工作人员在操作、保养、维护、修理或调整过程中,尽量避免危险,例如:危险的化学药品、高电压、电磁辐射、切削锋口或尖锐部分等。

(4) 尽量减少恶劣环境条件(例如:温度、压力、噪声、毒性、加速度、振动、冲击和有害射线等)所导致的危险。

(5) 系统设计时应尽量减少在系统的使用和保障中人为差错所导致的风险。

(6) 为把不能消除的危险所形成的风险减少到最低程度,应考虑采取补偿措施,这类补偿措施包括:联锁、冗余、故障安全保护设计、系统防护、灭火和防护服、防护设备、防护规程等。

(7) 用隔离或屏蔽的方法保护有冗余的分系统的电源、控制装置和关键零部件。

(8) 当各种补偿设计方法都不能消除危险时,在装配、使用、维护和修理说明书中应给出报警和注意事项,并在危险零部件、器材、设备和设施上标出醒目的标记,以使人员、设备得到保护。

(9) 尽量减轻事故中人员的伤害和设备的损坏。

(10) 软件中应包含控制或检测功能,以尽可能减少危险事件或事故的发生。

4.1.2 安全性措施优先次序要求

系统采取安全性措施的优先次序如下:

(1) 最小风险设计。首先在设计上消除危险,若不能消除已判定的危险,应通过设计方案的选择将其风险减少到规定的可接受水平。

(2) 采用安全装置。若不能通过设计消除已判定的危险或不能通过设计方案的选择满足要求,则应采用永久性的、自动的或其他安全防护装置,使风险减少到可接受的水平。

(3) 采用报警装置。若设计和安全装置都不能有效的消除已判定的危险或满足要求,则应采用报警装置来检测出危险状况,并向有关人员发出适当的报警信号。报警信号应明显,以尽量减少人员对信号作出错误反应的可能性,并应在同类系统内标准化。

(4) 制定专用规程和进行培训。若通过设计方案的选择不能消除危险,或采用安全装置和报警装置也不能满足要求,则应制定专用的规程和进行培训。对于后果严重的危险决不能仅仅使用报警、注意事项或其他形式的提醒作为唯一的减少风险的方法。专用的规程包括个人防护装置的使用方法。对于关键的工作,必要时应要求考核人员的熟练程度。

4.2 电力推进系统电气设备安全

4.2.1 可动零部件

(1) 操作人员易触及的可动零部件应尽可能封闭,以避免运转时与其接触。

(2) 电气设备运行时,操作人员需要接近的可动零部件,必须配置安全防护装置。

(3) 为防止运行中的零部件超过极限位置,应设置限位装置。

(4) 电气设备上的可动零部件或载荷所具有的动能和势能可引起危险时,必须配置限速、防坠落或防逆转装置。

(5) 电气设备高速旋转的零部件,必须配置有足够强度、刚度和合适形状、尺寸的防护罩。必要时应规定此类零部件检查和更换的期限。

4.2.2 表面

电气设备应设计成不带易伤人的尖角、利棱、凹凸不平的表面和较突出的部分,如果有,应加以遮盖。

4.2.3 外壳

(1) 金属外壳的固定部分应与不带电的金属部件在电气上连接并接至接地端子。外壳的可拆卸部分应稳固的固定在它的固定部分上,必须采取措施以防止因电器操作或舰船振动而导致松动或分离;当外壳设计成允许不使用工具可打开其罩壳时,应采取措施防止紧固器件的失落,如果外壳上装有按钮,不允许从外部拆下按钮。

(2) 金属外壳必须防止与带电部件有意外的接触,并考虑必要的电气间隙和爬电距离。

(3) 舰船上各类场所安装的电气设备,其外壳防护型式应符合相关规定。

(4) 应对电气设备的外壳进行外壳防护试验,如无特殊规定一般应在不通电的状态下进行。试验后产品的绝缘电阻和介电强度应满足产品技术条件规定。

(5) 框架式断路器、接触器等开启式电气设备,至少其结构、框架应能防止工作人员偶然触及内部发热部件、带电部件或运动部件。

4.2.4 隔离电器

(1) 隔离电器在其触头断开位置时,必须具有符合隔离功能要求的隔离距离,并应装有显示动触头位置的指示器,位置指示器应与动触头可靠的连接。

(2) 当舰船用电器安装就位,并在运行时具有罩壳,且触头的断开在外部可见,则不需要再装位置指示器。

4.2.5 蓄电池

(1) 蓄电池的导电部分应与外壳绝缘,绝缘电阻应不小于 $20\text{M}\Omega$ 。

(2) 酸性和碱性蓄电池严禁安装于同一专用舱室、箱或柜中。

(3) 当电解液液面为最高允许值时,蓄电池向任一方向前倾斜和摇摆 45° 应无电解液渗、溅出。

(4) 蓄电池的封口剂,应在的温度范围内不发生裂缝和融流。

(5) 蓄电池室内除安装蓄电池和照明用防爆灯具外,避免安装其他电气设备,照明电缆应穿管敷设,其他电缆不应通过。

(6) 蓄电池室、箱和柜除通风口外,其他开孔(含门、盖)均应有密封措施,防止爆炸性气体进入非危险区域。

(7) 在蓄电池室、箱、柜外面,应有“禁止烟火”的标记。

4.2.5.1 水面舰船用蓄电池组

(1) 碱性单体蓄电池外壳应采用高强度绝缘材料,采用

金属材料时,应有防止蓄电池外壳与极柱、单体电池与单体电池之间短路的设施,外壳不允许带电。

(2) 蓄电池室、箱、柜应有独立的机械或自然通风装置通向露天。出风口应在顶部,进风口应在出风口对角的底部,两者均应有防止水和火焰进入的措施。

(3) 免维护密封型蓄电池应具有防爆性能,即蓄电池外部有持续明火时蓄电池内部不应引爆。

4.2.5.2 潜艇用铅酸主蓄电池

(1) 在蓄电池组汇流排连接、补偿电缆敷设及其附属系统布置时,应充分考虑艇员进行蓄电池组维护、检测时的人身安全和操作方便。

(2) 蓄电池在连接布置时,相邻两电池的电位差应不大于 50V 。

(3) 安装完毕的蓄电池组(包括全部附属系统)应有良好的绝缘。在所有蓄电池冷管充满水的情况下,蓄电池组在深度放电后,全充电结束时的绝缘电阻不低于 $0.5\text{M}\Omega$ 。分组串连电池数为 112 的一倍及以上时,其绝缘电阻值原则上仍按上述要求。如确有困难,在确保人员和系统安全的情况下,经征得使用部门同意,其绝缘电阻值可在技术文件上另行规定。

(4) 蓄电池室通风量的设计,应保证在蓄电池组充电时和充电后,室内空气的含氢量和温度处于安全范围之内。

(5) 处于舱底的蓄电池应设置“有水信号报警系统”并有排除积水设施。

(6) 蓄电池组特性参数自动检测装置,应满足规定的测量精度和稳定性要求。

(7) 传感器及检测线路装置应有防止产生火花和短路的安全措施。线路布置不应影响蓄电池组原有的绝缘性能。

4.2.6 变流调速设备

设计应遵循故障安全准则,当装置因内部或外部原因出现故障运行时,装置应能保证不至扩大故障或受到损害,不应危及人员和相关设备的运行安全。

(1) 对热敏感的半导体装置应采取措施有效的与热源隔离。

(2) 应采取简单有效的散热方法将装置的热量带走。

(3) 强迫风冷时,进风口的位置一般应设在设备的底部,排风口的位置一般应设在设备顶部。通风口应设有金属栅加以避护和屏蔽;保护装置动作时,通风口中不应有灼热的空气或烧熔的金属喷出。

(4) 控制回路应用隔离变压器与主回路隔离。

4.2.7 推进电机

(1) 推进发电机和与其相连的控制板、推进电动机和与其相连的控制板的冷态绝缘电阻,对主回路的电压为 500V 及以下的电力系统应不低于 $4\text{M}\Omega$,其热态绝缘电阻应不低于 $0.5\text{M}\Omega$ 。绝缘电阻的测量应尽可能在室温高于露点温度时进行。对主回路电压为 $501\sim 1000\text{V}$ 的电力系统,其绝缘电阻值由产品技术条件规定。

(2) 推进电机的轴承和润滑,在电机所有正常工况条件范围内,应保证轴承良好的润滑和工作。润滑油(脂)不能从轴承中渗透或溢出。

(3) 推进电动机应能承受 150% 额定功率持续 5min ,而不发生变形或损坏,此时温升不作考核。

4.2.8 检测与控制装置

(1) 为了对电力推进系统实施正确得控制并保证整个系统的安全,推进控制台(板)应具有必要的显示、报警和安全保护功能。

(2) 凡按一定程序操作的推进控制板,必须设有可靠的联锁装置,以保证人员安全、运行可靠和防止由于误操作引起系统和设备的损坏。

(3) 集中控制室应尽可能设有两个远离的进出通道,其中之一应靠近脱险通道。

(4) 控制系统按故障安全原则设计时,不仅应考虑系统本身和与之有关的设备,还应考虑到整个舰船的安全。

(5) 当自动控制或遥控系统发生故障或失效时,应能:

1) 发出报警信号。

2) 及时更换损坏的部件或投入冗余设备以恢复正常的控制功能。

3) 转换到机旁手动控制。转换控制时不应引起设备运行状态的严重变化。

(6) 控制台内应设熔断器或断路器等电气保护装置,以免控制台因故障而损坏。一个仪器故障应不会引起控制台内其他仪器的不正确动作、故障或断电。

(7) 紧急按钮与越控按钮的布置应设有防止误操作的措施。

(8) 安全装置不允许与其他监控装置合用传感器,并保证发生断路也不会造成安全装置的误动作。

(9) 若安全装置与其他监控装置合用一台计算机,则计算机对安全装置的信息处理应优先与对其他监控装置的信息处理。

4.2.9 高压电缆

(1) 高压电缆路经居住处所时,应敷设在封闭的电缆敷设系统内。

(2) 高压电缆应与其他不同工作电压的电缆分隔开,特别是它们不应敷设在同一电缆束,或同一电缆槽、同一管道中、同一箱(盒)中。

(3) 当不同电压等级的高压电缆安装在同一电缆托架上时,电缆间的电气间隙应不小于其中较高电压等级所要求的最小值。但高压电缆不应与额定电压 1kV 及以下的电缆安装在同一电缆托架上。

(4) 通常,具有连续并有效接地的金属护套或铠装高压电缆应安放在托架上。否则,整根电缆均应安装在有效接地的金属铸件中。

(5) 高压电缆所有导体的端头应尽可能有效地覆盖上合适地绝缘材料,在接线盒中若导体无绝缘层,则相间和相对地之间均应用合适地绝缘材料制成的坚固隔板隔开。径向场类型的高电压电缆,如在绝缘中具有控制电场的导电层,应具有提供电应力控制的端头。

(6) 端头应是和电缆的绝缘和保护层材料相兼容的形式,且应将电缆的所有金属保护层(例如金属带、金属丝等)接地。

(7) 高压电缆应具有合适的标志,以便识别。

4.3 电力推进系统保护设计要求

4.3.1 一般要求

(1) 若在主电路中设有过电流保护电器,则其整定值应在考虑其他设备承受能力的前提下,保证不会由于机动航行或在恶劣海况或浮冰中航行时所产生的过电流,而使该过电流保护电器动作。

(2) 在推进电动机可能出现超速(例如在轻载或丢失螺旋桨情况)的直流系统中,应设置合适的超速保护。

(3) 若数台独立驱动的直流发电机在电气上作串连接,则应设有某台原动机丧失动力的情况下引起发电机逆转

的保护措施。

(4) 励磁电路不应设置断开电路的过载保护。

(5) 应设有选择性脱扣设备或采用快速减少发电机和电动机磁通的方式,以保证过电流不会损坏推进装置。

(6) 在三相推进系统中,应设有不平衡保护设备,在推进电动机各相电流有较大差异情况下,该保护设备应能使推进发电机和推进电动机去磁或断开有关电路。

(7) 应设有对主推进电路对地漏电流检测,并能在出现接地故障时发出报警的设备。

(8) 应设有对推进电机励磁电路对地漏电流检测设备,但无励磁系统和 500kW 以下的电机可以免设。

(9) 直流电机及其保护系统的设计,应考虑在短路时能将损害降低至最小程度的必要措施。

(10) 若有螺旋桨堵转的可能性,则应设置防止推进装置损坏的保护装置。

4.3.2 短路保护

(1) 船舶电力推进系统应设置包括短路在内的过电流保护。该种保护装置的脱扣/故障消除时间应能提供完全而协调的保护,以保证:

1) 通过该保护装置的选择性作用,使在故障情况下重要设备和应急设备还可工作,并尽可能使其他非故障设备得以工作。

2) 清除故障,以减少对系统的损害和起火的危险。

3) 对每一电源和在一条配电电路分成两条或更多附属电路的分支点处应设置短路保护。

4) 可以证明由于保护装置误动作所产生的危险可能比故障引起的危险更大的电路应不设置保护装置。

5) 连接到某些其内部已具有短路保护装置的设备,或者可以证明它们不大可能在短路情况下损坏,以及敷设的方式已使短路危险减少到最小程度的电缆或电线,可免除设置短路保护装置。

6) 除在按规定可免除者外,在配电系统的每一不接点的极或相上均应设置短路保护装置。

(2) 应采用断路器或熔断器作为短路保护装置。

(3) 重要设备有关电路用断路器的额定运行短路分断能力,应不低于其安装点所对应分断的最大预期短路电流。对于交流系统,其额定运行短路分断能力应不低于其安装点的预期对称短路电流的方均根值。

(4) 使用类别 B 断路器(带短延时)的额定短时耐受电流,应不低于其安装点其触头分断瞬间的最大预期短路电流。对于交流系统,其额定短时耐受电流应不低于其安装点触头分断瞬间的预期对称短路电流的方均根值。

(5) 所有可能在短路情况下接通的断路器或开关,其额定短路接通能力应不低于其安装点的预期短路电流的最大峰值。

(6) 可以使用熔断器接在负载侧的带熔断器断路器,但其提供后备保护的熔断器与断路器应设计成协调动作,从而保证当它们承受会引起熔断器熔断的过电流的情况下,熔断器能在适当的时候熔断,以防止在断路器的极间或极与金属部件之间产生飞弧。

(7) 在确定对上述后备保护组合的短路性能要求时,允许计及该组合中各元件的阻抗。

(8) 除另有规定外,重要设备电路的短路保护应是选择性保护,并应符合下列规定:

1) 在发生短路故障情况下,应保证仅限最接近故障点的保护电器动作切断故障电路。

2) 串联连接的保护电气的动作时间应仔细协调。

3) 在选择性保护所要求的时间内, 保护电器应具有能承载其安装处的短路电流而不分断的能力。

4.3.3 过载保护

(1) 设置作为过载保护的保护装置, 其特性应确保对电缆敷线和电气设备的保护, 以防止因机械或电气过载而引起过热。

(2) 过载保护应设置在:

1) 直流双线绝缘系统或交流单相绝缘系统: 至少一个极(或相)上。

2) 交流三相绝缘系统: 至少二相上。

3) 接地系统: 每一不接地的极(或相)上。

(3) 用作过载保护的断路器, 应具有与其保护对象的过载能力以及系统的选择性要求相适应的脱扣特性(过电流—脱扣时间特性)。

(4) 等于及小于 320A 的熔断器, 若具有合适的特性可用作过载保护, 但 200A 以上时, 推荐采用断路器或与它相类似的设备作为过载保护。

(5) 额定电压(相间电压)超过 1kV 的交流三相电气装置, 不允许用熔断器作为过载保护。

4.3.4 接地故障保护

(1) 通过阻抗器接地的配电系统应设有连续监测和指示流过接地线中电流的设施。

(2) 如果在接地线中的电流超过 5A, 应该发出警报, 并且故障电流应自动断开或限制到一个安全的数值。

(3) 每一个用来断开接地故障电流的装置, 其额定短路容量应不小于其安装点预期的接地故障电流。

(4) 具有电压波形谐波畸变的中性点绝缘系统, 由于电容的作用可能引起接地故障电流超过(2)中规定, 应能隔离该故障电路。

(5) 系统中任何接地故障应有视觉和听觉报警。在低阻抗或直接接地的系统中, 应设有能自动切断故障电路的保护设备。在高阻抗接地系统中, 如果发生接地故障时输出电源未断开, 则设备的绝缘应按相对相电压来设计。

4.3.5 馈电线路保护

(1) 每一馈电线路应以同时分断所有绝缘极的多级断路器或多级开关加熔断器作为过载和短路保护。

(2) 当采用多级开关加熔断器作为过载和短路保护时, 应满足如下要求:

1) 主配电板引出的馈电分路上的熔断器, 应设于汇流排和开关之间。

2) 分配电板引出的等于及小于 60A 的最后分路, 且由它供电的用电设备可在它的附近关闭时, 可免设开关。

(3) 供电给具有独立过载保护的用电设备的线路可仅设短路保护。

4.3.6 功率管理

(1) 电力推进系统应有足够功率以操纵船舶前进和倒退。推进设备在船舶以最大航速航行时应能在允许的时间内使船舶停止和倒退。

(2) 电力推进系统对一般工作情况都应有足够转矩和功率裕量, 包括考虑了推进器和船舶特性的机动和恶劣海况。

(3) 电力推进系统的电功率可由推进任务专用的电源系统提供, 或由推进和船舶用负载两者合用的集中电源系统提供。

(4) 如果推进功率由集中的公用的电源系统提供, 控制系统应能保证在推进和船舶负载间安全地分配功率, 并在必要时能切除非主要负载和/或减小推进功率。

(5) 如果使用集中电源系统, 发电机组的台数和定额应在一台机组停止工作时, 余下的机组应能提供所有主要和正常船舶负载, 同时保持推进功率满足要求。

(6) 在集中电源系统中如果所需电力正常由并联工作的两台或更多的发电机组提供, 在一台机组突然停止供电时, 余下的机组的定额应足够保证主要负载和有效程度的推进功率不间断地工作。

4.3.7 变流调速设备的保护

(1) 变流调速设备可以采用空气冷却或液体冷却方式, 当其冷却系统没有正常工作时, 整个装置应能自动采取保护措施, 停止工作或使其所带负载自动减少到与可利用的冷却量相适应的水平。

(2) 为确保液体冷却的变流调速设备不致发生电气故障, 应设有泄漏报警器, 并应设有适当的措施容纳可能从设备中泄漏出来的任何液体。如果半导体和其他载流部件与冷却液体直接接触, 则该液体的电阻率是否合格应受到监测, 如该电阻率在适合的限值之外, 应在有关的控制站引发报警。

(3) 如果采用强制冷却, 应对冷却介质进行温度监测, 并带有当该温度超过预先设定数值时发出警报的报警器和停机装置。

(4) 应设有检验和监控装置以便于识别控制电路的故障和故障部件。

(5) 为变流调速设备装设的保护装置应确保在发生故障的情况下, 断路器、熔断器或控制系统的保护动作对该装置或其他电气装置不产生进一步的损害。

(6) 如变流调速设备有并联电路时, 则应保证负载在并联通路间均匀地分配。

(7) 在变流调速设备中, 应具有保证在电路通电以前使其电容器放电的装置。

(8) 任何在变流调速设备运行期间产生的再生功率, 不应导致对供电系统电压和频率超过限值的干扰。

4.3.8 推进电机的保护

(1) 推进电机应设有独立的过载、短路保护和欠电压保护。电机及其专用馈电电缆允许采用公共的短路保护。

(2) 保护电器应设计成允许在正常使用条件下电机在正常加速期间的电流通过。当电机的过载保护电器的时间—电流特性与电机的起动周期不相适应时, 则在电机加速过程中, 可允许过载保护有短暂的失效, 但短路保护仍应保持不变有效。

(3) 对连续工作制的电动机的保护电器, 应保证电机在过载情况下有可靠热保护的延时特性, 其最大持续电流, 应不超过被保护电机额定电流的 125%。

(4) 断续工作制电机的保护电器的整定电流和延时特性, 应在考虑了实际使用情况后选定。

(5) 当多相电机采用熔断器保护时, 应设置防止单相运转保护。

4.3.9 蓄电池的保护

(1) 蓄电池组应设有短路保护, 其保护电器应尽可能靠近蓄电池组。

(2) 每一蓄电池充电设备应设有由于充电电源电压的降低或丧失而导致蓄电池放电的保护。

4.3.10 电表、指示灯和控制电路的保护

(1) 电压表、测量仪表的电压线圈、接地指示器、指示灯以及它们的连接导线应采用熔断器加以保护。但若满足下列所有条件时, 则指示灯本身可以不设保护:

- 1) 指示灯与设备装在同一壳体内。
- 2) 指示灯从设备壳体内部电路供电。
- 3) 设备中保护电器的定额小于 25A。
- 4) 指示灯电路的故障不会导致重要设备供电的失效。

(2) 控制和保护用电器及设备的电压线圈应采用熔断器进行保护。但若满足下列条件, 则其本身可不设保护:

- 1) 线圈与设备在同一壳体内, 且由一总的保护电器进行保护。
- 2) 线圈由设备的电路供电, 且该电路的保护电器的定额小于 25A。

5 船舶电力推进用开关电器

5.1 概述

船舶电力推进用开关电器属船用低压电器。其交流电器在第 12 卷、第 2 篇、第 2 章中有详细介绍。本节仅介绍直流开关电器, 即直流电力推进用开关电器。在直流电力推进系统中, 主要开关电器包括蓄电池断路器、发电机断路器、推进电机电枢断路器、灭磁开关、接触器等产品。

5.1.1 使用环境条件

船舶电力推进用开关电器使用条件见表 5.2-9。

表 5.2-9 船舶电力推进用开关电器的使用环境条件

环境条件		额定数据
环境空气温度 ($^{\circ}\text{C}\leq$)	最高值	+45
	最低值	0
空气相对湿度 (%)		≤ 95
凝露		有
盐雾		有
油气		有
霉菌		有
倾斜度		$\leq 45^{\circ}$
振动		有
冲击		有

5.1.2 船舶电力推进用开关电器的基本技术要求

船舶电力推进用开关电器的设计和制造要充分考虑船舶使用环境条件的特点, 除应满足一般用途低压电器的有关要求外, 还应满足 GB/T 3783—1994《船用低压电器基本技术要求》的规定。

(1) 船用低压电器的选择, 根据船用工作环境的特殊要求, 所选用材料要求耐高温、耐冲击、耐油气以及防霉和防盐雾等。

(2) 船用低压电器的所有导电零部件, 应采用铜或黄铜制造, 并需有可靠的防护层; 金属零部件除不锈钢、锡青铜和磷青铜等材料之外, 均应有可靠的防护层, 其防护应满足湿热与盐雾试验之要求; 绝缘材料应按照 JB/T 834—1999《热带型低压电器》的要求进行选用, 由绝缘材料制成的零部件应进行相应的防霉处理。

(3) 船用低压电器要有防冲击、振动及倾斜的机构或装置, 以免在正常运行情况下由于冲击、振动而引起误动作。船用低压电器在安装平面任意方向倾斜不超过 45° 时, 应能正常可靠地工作; 其耐振动的能力应符合 GB/T 7094—2002《船用电器设备振动试验方法》中的有关规定。

(4) 船用低压电器根据使用地点不同, 要有不同的防护外壳, 以免水滴或爆炸性混合物引起设备故障。防护外壳等级分类应符合《电机、低压电器外壳防护等级》标准的有关规定。

5.1.3 结构防护措施

为了满足船用耐受冲击、振动和倾斜的使用特点, 船用低压电器必须在结构上采取相应的防护措施。

(1) 采用高强度的压制塑料。对于承受载荷和在运动系统中的塑料压制结构件, 尽量考虑采用具有高冲击强度的压制塑料来制造, 以防护电器受冲击时的损伤。

(2) 采用质量轻的结构材料。在冲击时电器所受的力主要是慢性力, 而慢性力的大小又是与结构零件的质量成比例的, 因此在满足性能与机械强度要求的原则下, 尽量采用质量轻的材料来制造结构零件。

(3) 提高结构机械强度。结构设计时尽可能采取多种措施提高构件的机械强度, 尽量避免构件应力集中, 增加构件承受载荷的能力。

5.2 船用直流空气断路器、转换开关

5.2.1 用途及分类

船用直流空气断路器(以下简称断路器)主要用于船舶直流电力系统中, 当回路出现过载和短路电流时, 空气断路器能可靠地自动断开电路。在正常情况下, 亦可用于不频繁地接通和断开低电感负载电路。断路器按用途分类见表 5.2-10。

表 5.2-10 断路器分类

名称	电 流	保护特性	主要用途
电枢断路器	直 流 1800~4000A	瞬动 长延时	保护推进电动机
蓄电池断路器	直流 ^① 2500A \times 2~4000A \times 2	瞬动 长延时	保护蓄电池、 直流电网
发电机断路器	直流 2000~4000A	瞬动 长延时	保护发电机

① 相邻两极并联。

转换开关主要用于船舶直流电力系统中, 作电路转换、隔离、短接起动电阻等用途。

5.2.2 主要技术参数

几种典型断路器和转换开关的主要技术参数见表 5.2-11、表 5.2-12。

表 5.2-11 几种典型的断路器主要技术参数

断路器型号	DW9-440	ZDW2-31	ZDW2-71	ZDW4-21	ZDW5-41	ZDW6-41
额定工作电压(V)	400	800	800	430~640	320	320
额定工作电流(A)	4000	2500	2500 \times 2 ^①	2000	4000	4000
短路通断能力(A)	60 000	46 600	45 000	27 000	55 000	85 000
时间常数(ms)	10	6	10	10	10	10
机械寿命(次)		5100	5100	5000	4000	3500
电 寿 命(次)		500	500	500	400	500
外形尺寸(mm ³)		729 \times 640 \times 354	729 \times 640 \times 354	738 \times 396 \times 394	412 \times 543 \times 394	408 \times 913 \times 405
质量(kg)		≤ 170	≤ 170	≤ 90	≤ 92	≤ 117
极数	4	4	4	2	2	2

① 相邻两极并联。

表 5.2-12 几种典型的转换开关主要技术参数

转换开关型号	ZDH4-11、12	ZDH5-11	ZHH2-01、02	ZHH3-31、32
额定电压(V)	480	550	640	800
额定电流(A)	1600	1800	600	2500
电寿命(次)	4000	4000	2000	4000
机械寿命(次)	16 000	16 000	8000	16 000
外形尺寸(mm×mm×mm)	131×376×377	247×376×377	185×310×276	191×376×354
质量(kg)	22	46	26	32

5.2.3 工作原理

断路器一般由感受元件、执行元件和传递元件三部分组成。

(1) 感受元件。能感受到电路中不正常的情况和操作人员的命令或其他继电保护系统的信号，通过传递元件使执行元件动作，如过电流脱扣器和失电压脱扣器等。

(2) 执行元件。包括触头和灭弧室。触头执行接通或分断电路的任务，灭弧室是用来帮助执行任务的。

(3) 传递元件。承担力的传递、变换的零部件，它包括传动机构、自由脱扣机构、主轴、脱扣轴等。

不同用途的断路器各部件的具体结构有所差异，但是基本动作原理大体相同。现以 ZDW6-41 断路器为例介绍其工作原理。

5.2.3.1 ZDW6-41 断路器合闸操作

(1) ZDW6-41 断路器手柄操作合闸。图 5.2-27 所示为 ZDW6-41 断路器工作原理示意图。图 5.2-28 所示为 ZDW6-41 断路器自由脱扣机构原理示意图。ZDW6-41 断路器手柄操作合闸的方法及动作原理如下：

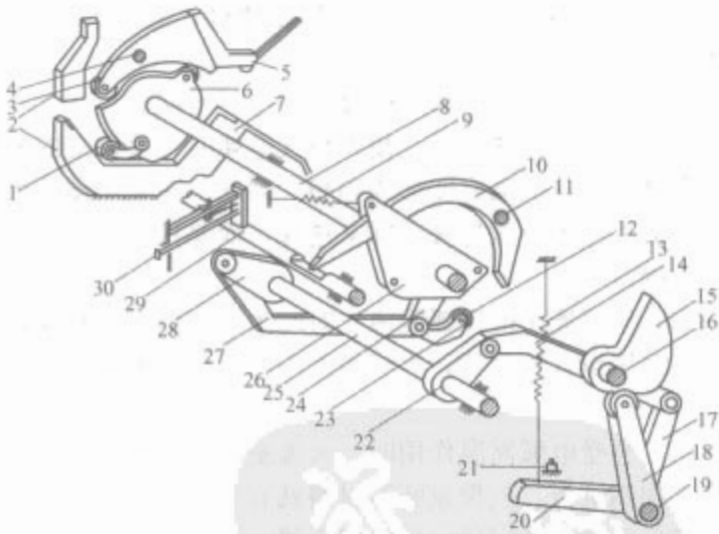


图 5.2-27 ZDW6-41 断路器工作原理示意图

1—主动触头；2—主静触头；3—滚轮；4—导电轴销；5—动弧触头；6—凸轮；7—静弧触头；8—触头轴；9—断开弹簧；10—跳扣；11—轴 1；12—滚子 3；13—储能弹簧；14—拉杆 1；15—凸轮；16—蜗轮轴；17—杠杆 2；18—杠杆 1；19—轴 0；20—杠杆 3；21—储能开关；22—杠杆 4；23—杠杆 6；24—杠杆 7；25—操作轴；26—杠杆 8；27—拉杆 2；28—杠杆 5；29—脱扣轴；30—脱扣按钮

1) 用手将手柄从凹槽内拉出成 90°，然后顺时针转动手柄，使储能弹簧储能，并使自由脱扣机构达“再扣”位置。为了使合闸时间与操作无关，采用弹簧储能快速合闸。如图 5.2-27 所示，手柄通过蜗杆、蜗轮，带动蜗轮轴和凸轮转

动。凸轮压杠杆 1 反时针方向转动，通过轴 0，使杠杆 2、3 也随之反时针方向转。杠杆 3 将储能弹簧拉长，使弹簧储有位能。

同时，杠杆 2 推动拉杆 1，使杠杆 4、操作轴反时针方向转动。操作轴使杠杆 5 亦反时针方向转动，推动拉杆 2、杠杆 7、6、跳扣尾部，使跳扣头部搭在脱扣轴上。同时杠杆 7 的凸起部分顶住杠杆 9 上的滚子，于是使自由脱扣机构处于图 5.2-28 的“再扣”位置。

2) 继续转动手柄，使储能弹簧释放，开关合闸。凸轮转至最低点，并突然滑过杠杆 1 上的滚子，不再压住传动杠杆。储能弹簧被突然释放，以其位能收缩力拉回传动杠杆。杠杆 3、1、2 被拉向顺时针方向转，通过拉杆 1、杠杆 4，使操作轴亦顺时针方向转动。操作轴使杠杆 5 顺时针方向转，拉动杠杆 2、杠杆 6、7、9 和 8，使触头轴顺时针方向转，同时杠杆 8 将断开弹簧拉伸。触头轴带动凸轮顺时针方向转，凸轮带动弧触头和动主触头顺时针方向转，使弧触头、主触头闭合，即开关合闸。此时，自由脱扣机构处于图 5.2-28 的合闸位置。

(2) ZDW6-41 断路器分闸预储能及电动合闸。图 5.2-29 所示为 ZDW6-41 断路器的电路原理图，工作原理如下：

1) 分闸预储能：当断路器处于断开状态时，若断路器施加有 DC 175~320V 控制电源，则回路：电源（+）→ QF 动断→KA（中间继电器线圈）→XK 动断→K2→电源（-）导通，中间继电器线圈 KA 带电动作，其动合动断触点发生转换，接通电动机回路：电源（+）→R1（I 段 10Ω）→电动机励磁绕组（L）→KA（原动合触点）→电动机电枢绕组（M）→KA（原动合触点）→电源（-），电动机转动，通过齿轮减速箱带动合闸弹簧储能，当弹簧储能到预定位置时，行程开关 XK 发生转换，行程开关 XK 动断触点断开了中间继电器 KA 线圈回路，中间继电器 KA 复位，其辅助触点转换，切断电动机合闸回路，同时由其动断触点、电阻 R1、电动机励磁绕组和电枢绕组形成能耗制动回路，使电动机急停，预储能准确定位。至此断路器预储能过程完成。

在电动机励磁绕组 L 两端并有续流二极管，是为了帮助电动机在制动起励用。电阻 R1 为限流电阻，它分为两段，合闸时 I 段（10Ω）起作用，既可以限制电流，又能使电动机在 DC 175V 时有足够的起动力矩；制动时整个电阻均起作用，可以有效限制电动机能耗制动时的电火花。电阻 R2 为压敏电阻，限制切断中间继电器线圈时产生的过电压。

2) 电动合闸：当断路器预储能已满时，此时按下闭合按钮 SB1 或接通系统遥控触点 S，都可以使中间继电器线圈重新带电，从而切断电动机制动回路，接通电动机合闸回路，使断路器闭合。

当断路器闭合后，断路器动断触点断开，切断中间继电器 KA 线圈回路，中间继电器 KA 复位，其动合触点断开电动机合闸回路，然后其动断触点接通电动机制动回路，完成电动机在断路器闭合后的制动。此时行程开关的触点 XK 已复位，为分闸预储能做好准备。

5.2.3.2 ZDW6-41 断路器分闸操作

(1) 手柄操作分闸。用手顺时针方向转动手柄，大约 8 圈左右，就可以使自由脱扣机构的半轴解扣，使断路器瞬时断开，完成手动操作后，用手按压手柄上的推杆，把手就会自动复位。

(2) 电动分闸。当断路器闭合后，其动合触点闭合，此

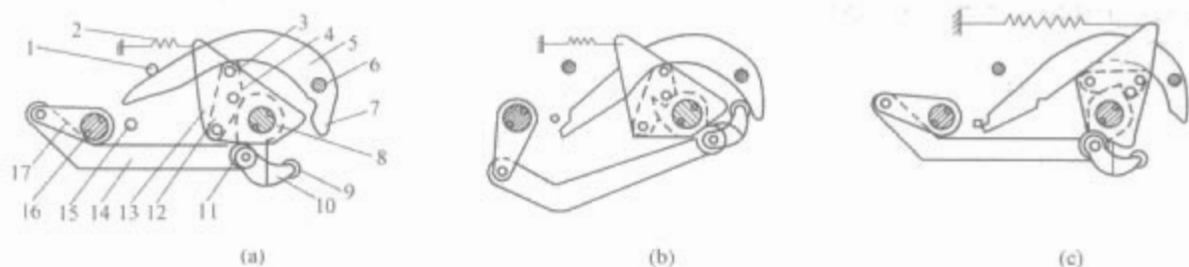


图 5.2-28 ZDW6-41 断路器自由脱扣机构原理示意图

(a) 断开位置；(b) 再扣位置；(c) 合闸位置

1—止钉；2—断开弹簧；3—滚子 2；4—滚子 1；5—跳扣；6—轴 1；7—跳扣尾部；8—触头轴；
9—滚子 3；10—杠杆 6；11—杠杆 7；12—杠杆 9；13—杠杆 8；14—拉杆 2；15—脱扣轴；
16—操作轴；17—杠杆 5

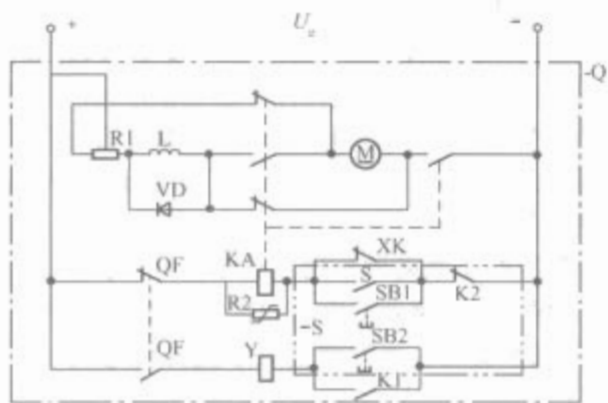


图 5.2-29 ZDW6-41 断路器电路原理图

-Q—断路器电动操作单元；-S—不装在-Q 单元的操作单元； U_e —操作电压；L—交直流串激电动机励磁绕组；M—交直流串激电动机电枢绕组；Y—断路器分励脱扣器线圈；QF—断路器辅助触点；R2—压敏电阻；XK—断路器接线端子排

时若按下分励按钮 SB2 或线路发生过电流保护使 K1 闭合，都能接通断路器的分励脱扣器的线圈 Y 使断路器断开（见图 5.2-29）。

5.2.3.3 转换开关的工作原理

转换开关是装在控制板内，由控制板内的杠杆机构带动转换开关传动轴上的操作杠杆，从而使动主触头和动弧触头转动，实现开关的“闭合”和“断开”。

5.2.4 断路器设计要点及典型结构

在元件设计以前，应首先确定断路器的总体结构方案和它的布置方式。

布置方式有平面布置和立体布置。平面布置的优点是安装方便，便于检修，但安装面积较大。立体布置则反之，能缩小断路器的安装面积。现在断路器设计大都采用立体布置。以下主要叙述断路器触头、灭弧系统、机构和脱扣器等元件的结构和设计。

5.2.4.1 触头系统的结构和设计

触头系统是断路器的执行元件，必须满足三个基本要求：

- (1) 安全可靠地接通和分断极限短路电流及其以下的所有电流。
- (2) 按标准规定的电寿命，在规定次数的接通和分断电路后不致严重磨损。
- (3) 长期工作制的载流能力。

在触头系统设计时，应合理设计触头参数。触头参数包括：触头开距、触头压力和触头超程等。还应合理选择触头材料，主触头要求有长期导电能力。可以采用银或银基合金，弧触头要求能耐弧、耐腐、耐熔焊，多采用银基合金。

电动力补偿是提高通断能力的有效措施。所谓电动力补偿就是合理地布置电流流过的途径，使短路电流所产生的电动力不是减小而是增加触头压力。电动力补偿有斥力补偿和吸力补偿两种。图 5.2-30 为具有斥力补偿的触头系统。在断路器闭合时轴 O 保持不动，当出现短路电流时，在平行导体之间所产生的斥力 F_c 将有使平行导体绕轴 O 反时针方向转动的趋势，增大了触头压力。

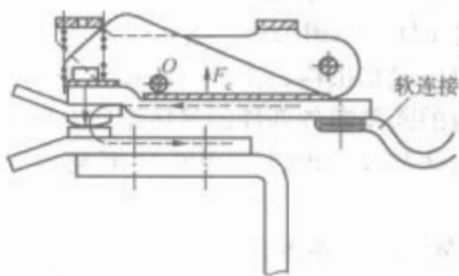


图 5.2-30 具有斥力补偿的触头系统

5.2.4.2 灭弧室的结构和设计

灭弧室是用以熄灭电弧的重要部件，必须保证如下性能：

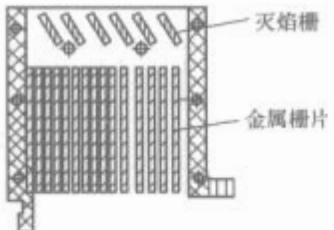
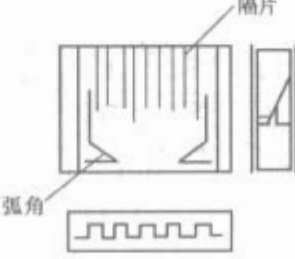
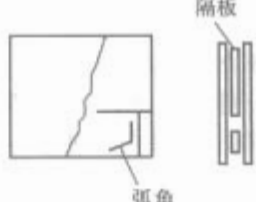
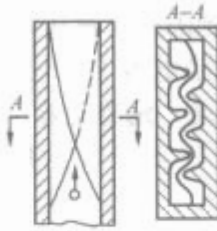
- (1) 可靠地熄灭电弧，燃弧时间应尽可能短。
- (2) 有足够的热容量，使在熄灭电弧时，灭弧室的温度不致太高，防止灭弧室变形或碎裂。因此，在采用栅片灭弧时，片数往往不是按接近极压降来选择，而是按尽可能增大热容量来确定。
- (3) 尽可能小的飞弧距离。有时为了降低飞弧距离，在栅片上部增设灭焰栅片，灭焰栅片的材料可用金属也可用绝缘材料。
- (4) 当受电弧高温作用时，灭弧室能产生有利于灭弧的气体，如钢纸板、三聚氰胺等材料就有这种特点。
- (5) 灭弧室的室壁应尽可能平整，既便于电弧运动，也有利于电弧与室壁接触而受到冷却，增强灭弧性能。
- (6) 有良好的绝缘性能，在受电弧高温作用后不容易碳化。
- (7) 有足够的机械强度，能承受电弧热能产生的压力，另一方面也可满足冲击、振动要求。

常用的几种灭弧室见表 5.2-13。

5.2.4.3 自由脱扣机构

自由脱扣机构的功能是实现传动机构和触头系统之间的联系。自由脱扣机构扣上时，传动机构应带动触头系统一起运动，并使触头闭合。当脱扣之后，即解脱了传动机构与触头系统之间的联系，其脱扣瞬间与传动机构的位置无关。

表 5.2-13 几种常用的灭弧室

名 称	结 构 图	作用原理和结构说明	优 缺 点
金属栅片式		<ol style="list-style-type: none">1. 去离子栅灭弧2. 栅片可平行布置，也可辐射状布置3. 灭弧栅可用金属材料，也可用绝缘材料4. 室壁材料可用石棉水泥或耐弧塑料等	<ol style="list-style-type: none">1. 交流灭弧性能较好2. 飞弧距离较小3. 制造较复杂
绝缘栅式		<ol style="list-style-type: none">1. 长弧灭弧原理2. 隔片用绝缘材料3. 室壁材料可用石棉水泥或玻璃丝板	<ol style="list-style-type: none">1. 适于熄灭直流电弧2. 外形尺寸较小3. 制造较复杂
纵缝式		<ol style="list-style-type: none">1. 长弧灭弧原理2. 纵向隔板把灭弧室分为 1~4 个窄缝3. 隔板用石棉水泥制成	<ol style="list-style-type: none">1. 适用于熄灭直流电弧2. 结构简单，制造方便3. 外形尺寸大4. 需加辅助磁吹
曲缝式		<ol style="list-style-type: none">1. 长弧灭弧原理2. 用石棉水泥或陶瓷制造3. 为了进一步拉长电弧，灭弧室内壁成犬牙交错状	<ol style="list-style-type: none">1. 适用于熄灭直流电弧2. 飞弧距离较小3. 节省金属材料4. 装配简单5. 需加磁吹

5.2.4.4 短路瞬时脱扣器

短路瞬时脱扣器的结构设计一般采用电磁式。应对短路瞬时脱扣器进行电磁吸力计算或通过相同结构的样机用实验方法获取吸力特性。短路瞬时脱扣器的衔铁应设计成绕轴静平衡结构，以达耐冲击、振动性能的要求。

5.2.5 选用原则及维修方法

5.2.5.1 断路器的一般选用条件

- (1) 断路器的额定电压 \geq 线路额定电压。
- (2) 断路器的额定电流 \geq 线路计算负载电流。
- (3) 断路器的脱扣器额定电流 \geq 线路计算负载电流。
- (4) 断路器的极限通断能力 \geq 线路中最大短路电流。

5.2.5.2 转换开关的一般选用条件

- (1) 转换开关的额定电压 \geq 线路额定电压。
- (2) 转换开关的额定电流 \geq 线路计算负载电流。

5.2.5.3 维修方法

断路器转换开关在使用过程中应保持清洁，清除灰尘、脏物、异物，并应定期对如下部位进行检查和维护：

- (1) 对断路器传动机构的转动和滑动部分涂以润滑脂。
- (2) 检查弧触头状况（检查时必须首先切断电流），当弧触头表面有金属颗粒和明显凹凸不平时，用钢锉刀修平滑，并用酒精清洗干净，注意清洗时只能用绸布等不会留下残留物的软布擦拭。

当弧触头的超程已不能满足规定的要求时，要对弧触头超程重新进行调整，即通过将动弧触头向静弧触头方向移动。若调整后仍不能满足要求时，必须更换新的动弧触头。当静弧触头上的银钨合金片厚度小于 2mm 时，则必须更换

静弧触头。

(3) 检查灭弧室，如发现灭弧室的陶瓷片有裂纹或破损，金属栅片已严重烧损或栅片间有熔接情况，则必须更换新的灭弧室，更换灭弧室时，必须保证新的灭弧室确为该台断路器、转换开关的备品。

若灭弧室完好，则对灭弧室内壁的金属粒子予以消除，并清理干净后，立即装回断路器、转换开关上（应注意不能改变灭弧室的安装方向），缺少灭弧室的断路器、转换开关会造成严重的设备、人身事故。

(4) 用于断路器电操回路的中间继电器 KA，其动合、动断触头用细砂纸和酒精清理表面可能存在的非导电性薄膜，若触点接触不良，会导致电动操作失灵，或预储能不能准确定位及断路器闭合后凸轮过冲使断路器断开。

(5) 消除断路器电动传动机构的电动机换向器上的碳刷灰，用纱布或绸布浸酒精清理，抹时注意不要让碳刷灰粘到电枢绕组端部绝缘材料上。

5.3 灭磁开关

5.3.1 用途

灭磁开关是一种适用于分断电机励磁回路电流的电器。由于电机励磁回路的电感量很大，分断励磁回路时，励磁绕组两端会产生很高的过电压。过高的过电压容易导致绕组绝缘击穿，因此灭磁开关必须采取有效的措施以限制励磁绕组两端的过电压。

灭磁开关用于电力推进系统中推进电机励磁回路的灭磁和过电压保护，也可用于各种电站发电机的灭磁、轧钢电机

磁场反向等场所。

灭磁开关的主要技术参数和指标(额定工作电压、电流):

(1) 主触头额定工作电压(V): 220、175~320、350~640。

(2) 主触头额定工作电流(A): 60、100、150、200。

(3) 控制回路工作电压(V): 220。

5.3.2 工作原理

灭磁开关电动操作控制原理图见图 5.2-31, 锁扣机构原理见图 5.2-32。

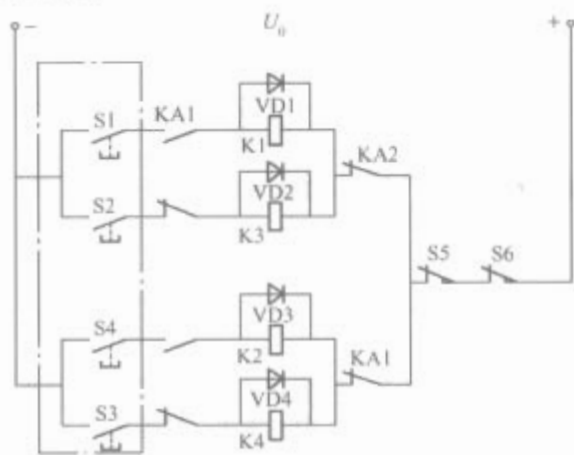


图 5.2-31 灭磁开关电动操作控制原理图

S1~S4—系统转换开关; D1~D4—续流二极管;
K1、K2—分励脱扣线圈; K3、K4—合闸线圈;
KA1、KA2—灭磁开关辅助开关; S5、S6—电操
与手操联锁行程开关

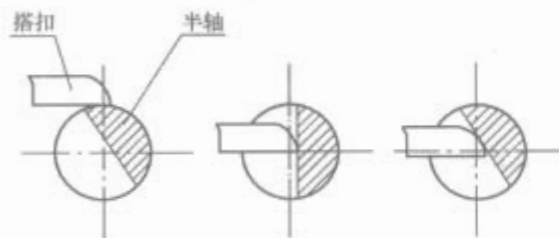


图 5.2-32 锁扣机构原理图

系统发出合闸信号(系统转换开关 S2 或 S3 合上, S2 为正向、S3 反向, 以正向为例), 电源正极→S6→S5→KA2 动断→K3→KA1 动断→S2→电源负极, 回路通, 吸合线圈 K3 得电, 衔铁带动搭扣向上运动, 搭扣带动半轴顺时针旋转, 搭扣上去后, 半轴在复位弹簧(图 5.2-32 中未画出)的带动下逆时针旋转复位, 此时开关已合闸, 辅助开关发生转换, 动断辅助开关 KA1 给吸合线圈 K3 断电, 衔铁带动搭扣回落, 搭扣搭在半轴上, 实现锁扣。

系统发出分闸信号(系统转换开关 S1 或 S4 合上, S1 为正向、S4 反向, 以正向为例), 电源正极→S6→S5→KA2 动断→K1→KA1 动合→S1→电源负极, 回路导通, 脱扣线圈 K1 得电, 半轴在脱扣线圈电磁力的作用下, 半轴顺时针旋转使搭扣脱开, 开关分闸, 辅助开关转换, KA1 动合触点给脱扣线圈 K1 断电。

5.3.3 设计要点及典型机构

本节主要介绍灭弧系统、压敏电阻和操作机构方案。

5.3.3.1 灭弧系统

图 5.2-33 为灭磁系统及触头系统图。电弧首先在弧触头 2 和 4 之间产生, 而后在横向线圈 5 所产生的磁场作用下沿着静弧触头快速向上运动, 并在引弧角 6 处进入到灭弧栅。灭弧栅由 74 片厚度为 2mm 的铜片组成, 各片之间用 1.5mm 厚的绝缘子隔开。灭弧栅片外形为圆形。灭弧栅的轴向外侧有 2 只径向线圈 7。在电弧进入灭弧栅的瞬间, 径

向线圈 7 由电弧接通。这样径向线圈 7 在灭弧栅之间就产生了径向磁场。进入这个磁场的电弧便绕着灭弧栅的轴线旋转。电弧运动的速度很快, 确保电弧不会停在栅片的某个位置而烧熔灭弧栅片。

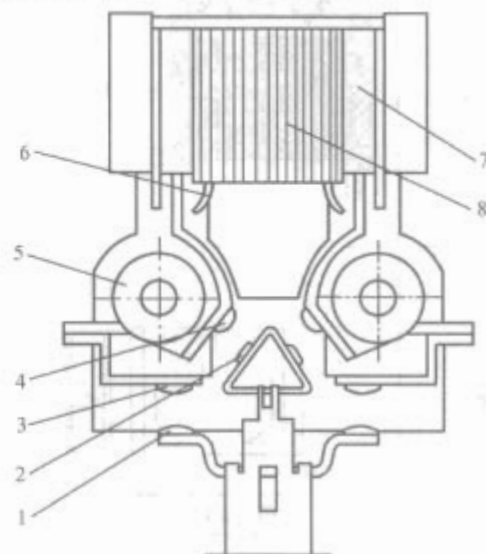


图 5.2-33 弧室及触头系统

1—动主触头; 2—动弧触头; 3—静主触
头; 4—静弧触头; 5—吹弧线圈; 6—引
弧角; 7—径向线圈; 8—灭弧栅片

5.3.3.2 压敏电阻

灭磁开关可用压敏电阻来消耗励磁绕组储存的能量, 同时压敏电阻可以起到限制灭磁开关分断过电压的作用。

设高能 ZnO 压敏电阻 R_v 开通电压为 U_{on} , $U_{on} < U_h - U_0$, 则压敏电阻导通, 励磁电流 i 通过压敏电阻 Z_1 、励磁绕组内阻 r_0 续流。图 5.2-34 为压敏电阻开通续流等效电路图。

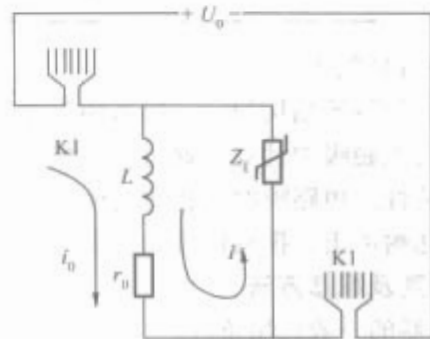


图 5.2-34 压敏电阻开通续流
等效电路图

为了确保压敏电阻导通, 灭磁开关分断时所产生的过电压 U_h 应大于 $U_{on} + U_0$ 。

5.3.3.3 操作机构

灭磁开关采用直动式电磁操作机构和半轴锁扣, 并装有手动操作机构, 利用手轮传动, 可以合分开关。为了防止开关被误操作, 在开关的手动操作与电动操作之间设有联锁。当开关手动操作合闸时, 不能进行电动操作。

5.3.4 选用原则及维护检修

5.3.4.1 灭磁开关的选用

灭磁开关主要应用于电机的励磁回路, 在选用时必须降额使用。励磁回路的额定工作电压和额定工作电流是选用灭磁开关的主要依据, 应选用高一等级的额定电压、额定电流、额定能量容量灭磁开关, 但励磁回路额定电流值不得低于所选灭磁开关的最小电流临界值。

5.3.4.2 维护检修

灭磁开关使用寿命的长短, 不仅取决于产品本身的技术

性能，而且与产品的使用维护是否符合要求有关。在安装、调整及使用灭磁开关时应注意以下各点：

(1) 安装前。

- 1) 应检查产品的铭牌及线圈上的技术参数是否符合实际使用要求。
- 2) 用手合分灭磁开关的运动部分，要求产品动作灵活。
- 3) 所有紧固件均应拧紧，并有完好弹簧垫圈，防止松动。

(2) 安装和调整。

- 1) 安装接线时，应注意勿使螺钉、垫圈、接线头等零件失落，以免落入灭磁开关内部造成卡住或短路现象。安装时，应注意将螺钉拧紧，以防振动松脱。
- 2) 检查接线正确后，应在主回路不带电的情况下，电动和手动分别合分灭磁开关数次，检查产品动作可靠，才能投入使用。

(3) 使用。

- 1) 使用期间，应定期检查产品的各部件，要求可动部分不卡，紧固件无松脱。零部件如有损坏，应及时修换。
- 2) 触头表面应经常保持清洁。当主触头表面出现电弧烧痕时，应及时清理并按调试守则调整开关主、弧触头的开距超程。当触头的厚度只有原来的1/2时应及时调换触头。
- 3) 灭弧室内壁如有黑色炭化痕迹，应及时清理，防止造成主回路短路故障。

5.3.4.3 灭磁开关常见故障及处理方法

表 5.2-14 列出了灭磁开关使用时常见的故障、原因及处理方法。

表 5.2-14 灭磁开关使用、常见故障、原因与处理方法

项次	故障种类	故障原因	检测方法	解决措施
1	电操时开关闭合不上	a. 主令开关接触不良	用万用表检查	调好主令开关触头的接触
		b. 控制回路断线	用万用表检查	将断线更换
		c. 电气间联锁触头接触不良或联锁触头接在动合触头上	用万用表检查	调整辅助开关的联锁触头或换到动断触头上
		d. 合闸线圈断路或短路	用万用表检查	更换新的线圈
		e. 半轴不能复位或复位太慢	目察	更换半轴复位弹簧
		f. 动触头或触头支架碰到灭弧室盖板	目察	松开固定触头支架螺钉，进行调整，然后再拧紧
2	电操时开关不能断开	a. 分闸线圈断路或短路	用万用表检查	更换新的线圈
		b. 同项次1中的a、b		
3	主触头起弧	弧触头接触不良	用万用表检查	清理弧触头开关的调试手则的有关项调整好触头

5.4 直流接触器

5.4.1 用途及分类

船用电力推进系统中，直流接触器采用永磁结构，具备磁锁扣功能。以实现推进电机励磁调节器与应急励磁电阻间的转换。也用于风机电机电枢回路的通断。

5.4.2 接触器的主要技术参数

船用直流断路器的主要技术参数有：

- (1) 主触头的额定工作电压 (V)：220、175~320、350~640。
- (2) 额定工作电流 (A)：10、15、20、25、40、60、100、150、200。
- (3) 控制电压 (V)：24、220。

5.4.3 工作原理

船用直流接触器的操作原理图（以永磁操作机构为例）见图 5.2-35，永磁操作机构见图 5.2-36。

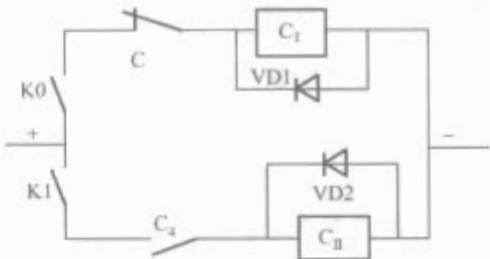


图 5.2-35 船用直流接触器的操作原理图
C—辅助开关；C₁—合闸线圈；C₂—分闸线圈；VD₁、VD₂—续流二极管；K₀—主控板提供的闭合触点；K₁—主控板提供的分断触点

(1) 合闸过程为：回路电源 (220V+) → K₀ → C 动断 → 合闸线圈 H → 电源 (220V-) 带电，接触器在合闸线圈 5 的作用下，克服永磁体 3 的保持力，向闭合位置运动，在即将到达闭合位置时，接触器辅助开关 C 动断转换为动合，给合闸线圈 5 断电，此时依靠永磁体产生的吸力使机构继续运动到闭合位置并保持，合闸过程结束，此时接触器的辅助开关已转换，为分闸操作做好准备。

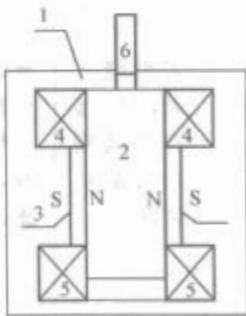


图 5.2-36 永磁操作机构

(2) 断开过程为：回路电源 → K₁ → C 动合 (已闭合) → 分闸线圈 T → 电源带电，接触器在分闸线圈 4 的作用下，克服永磁体 3 的保持力，向断开位置运动，在即将到达断开位置时，接触器辅助开关 C 转换为动合，给分闸线圈 4 断电，此时依靠永磁体产生的吸力使机构继续运动到断开位置并保持，断开过程结束，此时接触器的辅助开关已转换，为合闸操作做好准备。

5.4.4 设计要点及典型机构

本节主要介绍触头、灭弧系统和永磁操作机构方案。

5.4.4.1 触头灭弧系统

(1) 触头。触头用于接通分断电路，船用直流接触器主要采用的是双断点桥式触头见图 5.2-37。

双断点桥式触头的优点有：

- 1) 具有两个有效灭弧区域，灭弧效果好。
- 2) 触头开距小，接触器结构紧凑，体积小。
- 3) 冲击能量小，无软连接，有利于提高机械寿命。

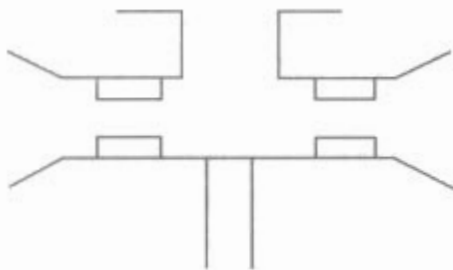


图 5.2-37 双断点桥式触头

船用接触器的触头材料多采用银基合金，此材料具有以下优点：

- 1) 耐电磨损与机械磨损。
 - 2) 抗熔焊性强。
 - 3) 接触电阻小而稳定，具有良好的导电性和导热性。
- (2) 灭弧系统结构型式。见表 5.2-15。

表 5.2-15 船用接触器所采用的灭弧方式

序号	灭弧方式	作用原理	优点	适用范围
1	利用触头回路电动力	电弧在触头回路电动力的作用下拉长，并沿法线方向迅速运动，弧柱冷却去游离，电弧压降增大，当大于触头两端的电压时电弧熄灭	结构简单	小容量接触器
2	串联磁吹、迷宫式纵缝灭弧，并装有金属栅片去游离装置	电弧在磁吹力的作用下，迅速进入纵缝，被金属栅片分割成若干短弧，并与纵隔板紧密接触，冷却强烈去游离，电弧熄灭	1. 用于 640V 以下时，灭弧可靠，效果显著 2. 喷弧区域小 3. 电弧热量容易散出，适于频繁操作	中小容量接触器

5.4.4.2 永磁操作机构（见图 5.2-36）

永磁操作机构由合闸线圈、分闸线圈、永磁体、铁心、连接杆和磁轭等组成。永磁机构是将电磁机构与永久磁铁有机地结合起来，无需任何机械能，仅通过永久磁铁产生的吸引力就可使触头系统保持在合、分闸位置上，操作简单，动作灵敏，其合闸和分闸线圈都是短时工作制。

5.4.5 选用原则及维护检修

5.4.5.1 接触器的选用

船用接触器一般是针对一定的使用要求进行设计的，在选用时必须适当降低容量（额定电压与额定电流均不要超过其设计值）或降低电寿命来使用。且在降低容量使用时，其电流选用值不得低于接触器的最小临界值。

5.4.5.2 维护检修

- (1) 使用前。
 - 1) 检查铭牌的技术数据是否符合实际使用要求。
 - 2) 仔细检查接触器动作的灵活性，要求灵活无卡住现象。
 - 3) 所有紧固件均应拧紧，并有完好弹簧垫圈，防止接触器动作后松动。
- (2) 安装调试。

1) 安装接线时，应注意勿使紧固件，接线头等零件失落，以免落入接触器造成卡住或短路现象。

2) 仔细检查接触器接线是否正确，应在主触头不通电的情况下，电操几次检查动作的灵活性、可靠性。

(3) 使用。

1) 使用其中接触器必须经常保持清洁，防止积污。

2) 定期检查主触头。如发现有毛刺、金属颗粒或凸凹不平应及时清理或用细锉修锉。当触头银块厚度磨损至一半时，必须用备品进行更换。

3) 经常检查灭弧室，如发现灭弧室有裂纹和破损，应及时更换灭弧室。

注：在给接触器做任何维护时，其主回路和控制回路都必须断电。

(4) 常见故障及处理方法。

1) 故障类别一。

a. 故障现象：接触器不能正常合分。

b. 分析及排除：

控制回路接线或线圈被破坏，换线或线圈。

辅助开关接触不良，更换辅助开关。

机构运动摩擦力过大，清除存在的灰尘污垢等杂物，并在所有运动摩擦部分涂钙-钠基润滑脂。

2) 故障类别二。

a. 故障现象：接触器温升过高。

b. 分析及排除：触头表面不干净或磨损严重使之接触不良，应清洁或更换后检查并调整触头压力。

6 船舶电力推进装置的结构

船舶电力推进系统（以下简称推进系统）各成套设备的结构，包括原动机、发电机、变频器、励磁机、推进电动机、电磁离合器等，在相应的章节中均有详细论述，因此，本节着重论述船舶电力推进装置（以下简称推进装置）中控制装置和监测装置的结构。

6.1 推进装置的设置和结构形式

6.1.1 控制装置和监测装置的设置

推进装置的控制方式主要包括驾驶室（或甲板）遥控控制、集控室自动控制和机舱（或板前）手动控制。推进装置的控制设备可以设置在任何方便的地方，但在机舱内必须设置一个可供转换的控制设备，而且在几个控制设备中应具有最高优先级，以便在应急情况下能在机旁进行控制。

当在机舱以外设有两个或两个以上的控制设备时，应该设置选择开关或其他设施，以便将操纵控制转移到指定的控制设备，每个操作地点都应设有指示哪个操作地点正在工作的指示灯，不应有几个控制设备同时控制。

所有控制原动机、运行方式选择开关、接触器和磁场开关等的控制装置均应设置联锁，以防止误操作，这些联锁应尽可能地采用机械联锁。如果开关或控制装置的操作必须维持一定的程序时，必须在电气上或机械上联动或联锁，以保证只能用正确的程序进行操作。

每个控制装置都应设有零位保护触点，保证使手柄从零位开始才能进行操纵。

一般来说，机舱或板前控制和监测装置应设有表 5.2-16（交流系统）或表 5.2-17（直流系统）规定的测量仪表。其他操纵地点应设有推进轴转向、转速指示器和其他必要的仪表，这些仪表应安装在操纵地点附近方便的地方。

表 5.2-16 交流推进系统测量仪表

项 目	仪 表	数 量	备 注
每一推进发电机	电流表	1	—
	电压表	1	
	功率表	1	
	频率表	1	
	整步表 无功功率表或 励磁电流表	1 1	仅适用于并联运行的发电机
大于 500kW 的推进发电机、电动机	定子绕组温度指示器	1	—
每一推进电动机	电流表	1	—
每一同步电动机	励磁电流表	1	—
每一推进轴	转向、转速指示器	1	—
半导体变流器中每一整流桥	电流表	1	—

表 5.2-17 直流推进系统测量仪表

项 目	仪 表	数 量	备 注
每一推进发电机	电流表	1	—
每一推进电动机	电压表	1	
	励磁电流表	2	
每一电动机电枢	电流表	1	适用于由主电力系统供电的推进电动机
每一电动机电枢变流器每一并联桥路输入端	电流表 电压表 电流表	1 1 1	适用于由半导体变流器供电的推进电动机
大于 500kW 的推进电动机换向极绕组	超温报警	1	—
每一推进轴	转向、转速指示器	1	—

6.1.2 控制装置和监测装置的结构形式

驾驶室和集控室控制通常采用控制台（集控台或显控台）或控制柜对推进装置进行控制和监测；而机舱控制（或机旁控制）则采用控制板（或开关板）的结构形式。

6.2 船舶电力推进装置结构的环境适应性

由于船用装置工作条件和工作环境的特殊性，与一般陆用装置相比，推进装置的结构设计应体现出相应的适应性。

除另外有规定外，船舶推进装置应在表 5.2-18 规定的条件下正常工作。

表 5.2-18 船舶推进装置工作环境

环境条件	要 求
环境空气温度最高值	50℃
	45℃(常规潜艇)
环境空气温度最低值	0℃(机舱)
	-10℃(一般舱室)
	-25℃(无保温措施的露天甲板舱室)
海上潮湿空气影响	有
盐雾影响	有(内河船舶除外)
油雾影响	有

续表

环境条件	要 求
霉菌影响	有
倾斜	≤30°
	横倾 ±15°，纵倾 ±10°(水面舰船)
	短时纵倾±30°各 3min(常规潜艇)
摇摆	≤45°
	横摇±45°；横摇周期为 3~14s(水面舰船)
振动	有
冲击	有
颠簸	有(仅对快艇)

概括起来，针对船用装置的特殊工作环境要求，船舶推进装置的结构在设计上应当遵循以下的设计准则。

6.2.1 热设计

- (1) 一般要求：
- 1) 应综合考虑总功耗、热功率密度、热源分布、热敏感性、热环境、元器件的允许工作温度及体积质量、经济性等情况选择最佳的冷却方法。
- 2) 热设计应具备在紧急状态下所要求的最基本的冷却措施，设备在冷却系统局部遭到破坏或不工作时，应能应急工作。
- 3) 冷却系统的工作应可靠，在规定的环境条件下，冷却系统必须能以重复和预定的方式完成所规定的功能。
- 4) 冷却系统应设有安全保护、故障指示，对关键器件的冷却应设有联锁保护装置。
- 5) 冷却系统的进出风口应有防尘、防滴、防电磁泄露装置。
- 6) 当特殊元器件不能满足有关规范的低温要求时，应采取加热措施。

- (2) 自然冷却：
- 1) 应最大限度的利用传导、辐射、对流等简单的冷却方法，充分利用机箱、机柜的金属外壳散热，增大机箱、机柜表面的黑度。
- 2) 热流通道要尽可能短、横截面大，用导热良好的材料。
- (3) 强迫冷却：
- 1) 应合理设计风路，防止风路短路和断路。
- 2) 风路设计应使强迫空气流动方向与自然对流空气流动方向一致。
- 3) 在能供应 25℃以下淡水作为冷却水的船舶上，若机柜内热耗较大时，宜采用密闭式气—水混合冷却方式。
- 4) 液体冷却的管道应阻力小，液流尽出口处宜采用自封接头，接头处不应有渗漏现象。
- 5) 必要时，液体管路中应有温度、流量、压力等指示装置。

- (4) 热安装：
- 1) 应尽量减小安装面的热阻。
- 2) 机箱、机柜内的元器件排列与安装应有利于流体的对流换热，避免在风道上安装大型元器件，以防阻塞气流。

6.2.2 抗振抗冲击设计

- (1) 机箱、机柜应有足够的刚度、强度，组装成设备后应满足有关要求。
- (2) 主结构与层次结构应按倍频规则设计，两者之间应尽量采用刚性连接。

(3) 当机箱、机柜组装成设备后,不能满足总体规定的环境要求时,则应采取隔振缓冲措施。

(4) 隔振系统的设计,应避免三个方向产生耦联,底部和背部的隔振器应匹配。

(5) 选用的隔振器必须符合舰船环境条件的要求,在额定负荷内三个方向均不应出现相对运动放大系数大于3的共振。

6.2.3 电磁兼容性设计

(1) 机箱、机柜应有良好的屏蔽、接地措施。

(2) 机柜上的面板、门、盖与机柜外壳之间应由良好的导电接触,必要时应使用导电衬垫。

(3) 尽量减少机箱、机柜的开孔,通风孔应采用金属网进行屏蔽,面板、门上的开孔如对屏蔽效能有影响,应采取屏蔽措施。

(4) 机箱、机柜内应设置地线系统,并能与船舶地线系统方便可靠连接。

6.2.4 维修性设计

(1) 机箱、机柜、控制台的设计必须满足正面维修的要求,内部元器件的组装密度应适当,便于元器件、零部件的装拆、检查、调整,凡需经常检查、维护、修理的零部件都应具有良好的可达性并应易于装拆,检查维修任一部分时一般不应拆卸、移动其他部分。

(2) 机箱、机柜内安装的导线、电缆应设有易识别、清晰牢固的标志。

(3) 应优先选用通用工具,并压缩工具品种,尽量减少使用特殊的装拆维修工具。

6.2.5 安全性设计

(1) 凡有安全要求的地方,应该用醒目的颜色标明安全性注意事项和安全标志。

(2) 机箱、机柜上所有外露金属零件、操纵杆、套筒等均应良好接地。

(3) 机箱、机柜的门和插箱应有定位、锁定装置。

(4) 机箱、机柜的外露凸出部位、拐角和边缘应避免棱角和锐边。

(5) 必须有人站立操作的机柜上应设置供操作人员抓握的扶手。

6.2.6 零部件要求

(1) 合理设计和选用零部件,以满足舰船环境条件要求。

(2) 应最大限度地采用标准零部件,优先选用符合国家标准的零部件。

(3) 紧固件的选用应贯彻一致性原则,尽量减少品种规格。

(4) 在零部件的设计中应充分考虑到通用化、系列化,并贯彻优化设计的原则。

(5) 机箱、机柜的附件应易于安装,使用应方便、灵活、可靠。

(6) 铝合金及合成树脂材料尽可能避免直接攻螺纹。

6.2.7 材料要求

(1) 机箱、机柜的主体材料应选用优质钢板、铝合金板、铸造铝合金、钢型材、铝型材等高强度的材料。

(2) 优先选用物理性能随温度变化小的材料,对绝缘材料应优先选用最高允许温度大于130℃的材料。

(3) 优先选用轻合金,但要充分考虑其强度和耐腐蚀性能。

(4) 可能产生金属电化偶不相容的金属不应相互接触配

制。必须使用时,应尽可能选择在电化序中电位差小的金属。

(5) 当采用铝结构件和钢结构件组合时,在它们的连接处应采用相应的防止电化学腐蚀的措施。

6.2.8 安装要求

(1) 安装在船舶舱室内的机箱、机柜的外型尺寸和形状应符合相应规范的规定。

(2) 当机柜外型尺寸超出总体的规定时,机柜应能解体,并能在舱室内重新组装。

(3) 机柜应能靠壁和并柜安装,结构设计应保证正面操作和维修。

(4) 机柜与舰船上基座之间的连接螺栓应能方便装拆,机柜的隔振器应配有安装板。

(5) 机柜的电缆连接器应设置在其顶部或底部,当设置在其底部时,应留有电缆和连接器插拔的空间。

(6) 台式机箱的电缆连接器应设置在机箱的背部,不允许设置在其顶部、底部或侧面。

(7) 挂壁式机箱的电缆连接器不允许设置在机箱的正面或背面。

(8) 机柜顶部一般应配有吊环螺钉。

6.2.9 工艺要求

(1) 金属防腐处理和工艺:除耐腐蚀金属之外的金属零件和铝制零件应按各类产品技术图纸进行防腐处理、涂层、电镀和涂漆。所有加工,例如焊接、机加工等,均应在防腐处理前完成。

(2) 电枢、转子和其他转动部分的金属表面应涂上绝缘清漆,电动机和发电机非转动部分的内表面可以涂上绝缘清漆或进行其他耐腐蚀处理。

(3) 油漆:接地接触面需要油漆,但需耐腐蚀时,则用除油漆之外的工艺(通常用油膜覆盖)来达到耐腐蚀要求。除此之外,耐腐蚀的金属零件均应油漆。

6.2.10 布线方法

(1) 线束:除采用走线槽护套布线外,所有接线应整齐地编组、扎紧或夹紧成束,使其避免由于振动和冲击而造成导线绝缘层的损坏。导线中不得有接头,所有连接处应在接线端子或接线板上。铰链面板上的线束应成形和夹紧,以使开启或关闭面板时,不产生锐弯。

(2) 线束材料:应使用耐燃的绳、带或套管作为包扎和系结材料,可以使用耐燃材料的撑块或夹板。

(3) 松弛:应有足够的松弛部分,当部件按预定要求移动时,对导线或部件不会产生影响,且不产生应力的损害。

(4) 机械支座:所有电气连接应设计和提供支座以防止由于振动、倾斜或冲击引起的破裂并使电气性能的变化尽量的小。

(5) 绝缘保护:凡是导线穿过金属隔板上的孔时,孔应配备绝缘的机械保护环。布线时应小心以保护不让导线在任何尖锐棱角或边缘上搁置或转弯。

6.3 船舶电力推进装置控制板结构

推进电机控制板的结构主要由框架、电器元件、机械传动机构、主电路汇流排等组成,主要电器元件包括:

(1) 转换开关—用于主电路的通断,蓄电池组的串、并联,电枢的串、并联等。

(2) 电枢断路器—用于推进电机电枢的通断和保护。

(3) 控制接触器—用于励磁控制电路、电操电路、风机控制电路等。

6.3.1 总体布局

推进电机控制板应按其功能，结构上分区布局，以便于操作、观察和维修：

(1) 控制主电路通断的转换开关、灭磁开关等需要操作的设备及其传动机构一般应布置在控制板的前半部，其中控制推进电机起动的转换开关布置在一层，而控制速区转换或推进电机正反转的转换开关布置在另一层。

(2) 电枢断路器及其控制接触器一般布置在控制板后半部。

(3) 操作手轮及测量仪表一般应布置在前面板上。

6.3.2 传动机构

控制板中的传动机构主要是指驱动转换开关、断路器、灭磁开关、磁场调节变阻器等设备的机构，这些机构的特点是低速、步进，且为正、反转并存，要求定位要准确、动作可靠，在动作过程中不应对这些设备产生附加力。设计时应将转换开关按功能布置在不同的传动轴上。传动轴按推进电机起动、速区选择、正反转选择等功能可分为起动轴、速度轴、可逆轴。设计传动机构时应按转换开关的闭合表对传动机构进行力学分析。同时，应尽量提高传动机构的效率以降低传动轴上的操作力。

平行四边形机构一般用来传动主电路的转换开关，该机构具有动作可靠、定位准确的特点，容易满足开关的闭合、断开要求，缺点是传动效率低，一般低于 0.4。主要用于开关力矩不大，同一轴上传动的开关数量不多的控制板传动。

拨杆机构也是一种步进机构，此机构效率比较高，常用来传动转换开关，但要求开关定位准确，因此可利用平行四边形机构作为定位，而不传递力，凸轮片的设计一定考虑拨杆机构和平行四边形机构互不干涉，否则发生卡死现象。这种机构调整比较困难，对于长轴，力矩大的场合可以采用。

马氏机构是一种步进机构或称间歇机构。控制板中以电动机为动力的传动轴上被采用，高速旋转的电动机经蜗轮蜗杆减速带动马氏机构，驱动传动轴作步进运动。一般步进角度为 60°。

齿轮传动广泛用于控制板，其作用大致分为两种，一种是 1:1 的传动，以移动操作手轮（柄）在控制板操作面板上位置，例如转换开关传动轴一般偏移面板中心线，为了让操作手轮置于控制板的中心线上，采用了 1:1 的齿轮传动，第二种情况是省力，例如断路器的力矩一般在 200N·m 以上，为了减小操作力矩，常采用改变齿轮传动比的办法，来保证操作力不致太大，这种传动比一般不大于 5:1，否则手轮旋转角度太大，一次操作不易到位。

同步带轮传动也可用于控制板的传动，随着推进电动机功率的增大，每个电枢的磁场回路需设置一台灭磁开关，两台灭磁开关的输出轴之间的距离较大，它们共用一个操作手柄，如用链条传动，则正反转有误差，齿轮传动体积太大，而同步带轮传动恰好满足要求。

凸轮机构广泛用于控制板传动，例如选择轴上联锁机构，平行四边形机构实际也是一种凸轮机构，凸轮片轮廓线的设计一般采用运行轨迹分析图的方法，但应避免效率过低。

由于开关的传动有手动和电动操作之分，手动时不让电动机构动作而增加操作力，电动时手动操作就无效和以防误操作，因此需要手动—电动分离机构，这种分离机构因结构而异，但均要求动作灵活，转换方便并有明显的指示。

定位机构或称闭锁机构的作用是将转轴固定在某一工况位置，这种机构要求在一个圆周内分度准确，定位可靠，并且从一个位置转到另一个位置的过程中不产生过大的阻力，

而且这种力不要和开关出现的尖峰力相重合，以免操作力过大。

平衡装置的作用是传动轴在起始转动一定角度后定位机构的阻力消失时，开关还未产生阻力（或不大），到开关接近闭合时出现尖峰力，这样转轴上的阻力增长突然，为了平衡转轴上的阻力，采用油减震器和凸轮杠杆相配合，在起始位压缩油缸活塞产生阻力达到这一目的。

转换开关的传动轴及安装转换开关的支架应采用非磁性材料。控制板的操作机构应设置必要的机械联锁和电气联锁。

6.3.3 母线设计

控制板中，用于连接主回路上各个电器设备的导电铜排称之为母线，亦称母排、汇流排，其截面积由铜材的导电系数和通过的额定电流决定。

母线设计的任务主要是选择合适截面的母线，确定母线的走向和固定，以及为外接电缆准备好条件，力求设计出的母线数量最少、结构最简单、便于安装。

控制板内主电路导线均采铜母线，其载流量按控制板技术条件中规定的最大发热试验电流，同时还要校核短时工况（例如 10min 工况）下的热稳定性及最大短路电流下的机械强度。

母线的支撑件要根据表 5.2-19 规定的电气间隙和爬电距离来设计，其结构还要考虑控制板内的空间位置。支撑件上应承受的最大动力以最大短路电流为依据。支撑件的材料选择还要考虑绝缘电阻和承受耐压试验，湿热试验的能力。

表 5.2-19 船用电力设备的爬电距离和电气间隙 mm

交流或直流电压 (V)	组 别	电气间隙	爬 电 距 离	
			开启式外壳	封闭式外壳
小于等于 64	A	1.6	1.6	1.6
	B	1.6	3.2	3.2
	C	1.6	12.7	9.5
64 以上至 150	A	1.6	1.6	1.6
	B	3.2	6.4	3.2
	C	6.4	19.1	9.5
150 以上至 300	A	1.6	1.6	1.6
	B	3.2	6.4	3.2
	C	6.4	19.1	12.7
300 以上至 600	A	1.6	3.2	3.2
	B	3.2	6.4	6.4
	C	6.4	19.1	12.7
600 以上至 1000	A	3.8	12.7	9.5
	B	6.6	25.4	19.1
	C	12.4	50.8	38.1
1000 以上至 3000	C	50.8	101.6	50.8

注 A 组——额定容量小于等于 50VA。
B 组——额定容量 50VA 以上至 2000VA。
C 组——额定容量大于 2000VA。
开启——开启式外壳的设备或部件。
封闭——除开启式以外外壳型式的设备或部件。

开关之间的母线连接在考虑电气间隙爬电距离、板内设备的维修空间等情况下，尽量简单，母线长度为最小，拐弯最少，制造方便，成形的单根母线尽量采用焊接工艺，避免使用紧固件（螺钉或铆钉）。

控制板主电路和外部设备的联系是通过电缆相联系的。主控板和推进电动机是母线连接的。因此控制板的母线应保证能将这些电缆接上的安装孔,开孔大小要和电缆接头大小匹配。母线和电缆的连接紧固件为钢质。

母线尽量不从开关之间和开关的喷弧区通过。

母线除电连接处的外表面应按标准规定的颜色涂漆,以表明母线所在电路中的极性,同时也有利于母线散热。

布置母线时,应充分考虑母线对利用电磁力原理工作的装置或设备(如过载保护装置)的影响。

对于半径大于76mm的顶部弯曲表面和平顶表面、能聚积灰尘和潮气的不规则表面,爬电距离应比上表中的规定值增加33%。

对于母线较多的主控板,母线在空间上几乎纵横贯穿于整个控制板内,设计者很难在分析图上确定其空间位置,因此,早期的母线设计是先做一个控制板及内部设备的1:1或2:1的木模型,然后用木板、铁丝模拟母线进行现场布置,据此只能确定每根母线的大致形状及轨迹,施工设计时还得重新设计和计算每段母线的尺寸及其与开关设备连接孔的尺寸。

三维设计软件以其强大的三维参数化设计功能及全相关性使得母线设计变得直观、直接、简单易行。由于三维设计软件能准确地捕捉并维护设计者的设计意图,因此,设计母线时可将最终的设计意图作为约束条件,在装配中创建母线零件进行设计。

6.3.4 结构设计

控制板的外形及外形尺寸应与船体总体设计单位充分协调,根据总体设计给出的尺寸空间及考虑必要的维修、操作空间确定。操作面外一般应留不小于500mm的操作空间,并能使人舒适站立。维修面外一般应留不小于500mm、高度不小于1500mm的维修空间。接电缆侧应留有不小于400mm的接线空间,板内还应留有元器件或设备的调节、调整空间。

板内元器件的布置应综合考虑母线布置、安装的可能性、维修性。

发热量大的元件或设备(如励磁变阻器等)应布置在控制板的最上层。

开关的喷弧方向应该一致,并保证按开关提供的喷弧距离留足空间,如果板内空间紧张,可采取绝缘隔离措施缩小其空间距离,但应有试验为基础,保证断路器在其规定的最高电压、最大电流分断时控制板框架不带电。

电气元件动作过程中会产生电弧或火花,应留有足够的飞弧区或采取隔离措施。

控制板的维修空间一般在开关的喷弧方向一侧,而板与外部设备连接的电力电缆应安排在开关的喷弧方向相反的一侧。

根据总体要求可设计为底部座装或顶部吊装。当其高度大于1400mm时,如为底部座装形式,则应在板侧上方增加防摆固定点;如为顶部吊装形式,则应在板侧下方增加防摆固定点。板应装设具有足够强度的吊环。

防护形式一般为防滴式。

板的操作机构一般应集中布置在板的正面,高度适宜,便于操作;测量仪表、信号灯布置在正面板上便于观察的部位。如果由于条件限制,操作机构不能全部布置在正面板上时,经有关部门同意,可选择操作次数少、不受操作速度限制的操作机构,置于正面板之外便于操作的部位。

控制板的操作方式由其技术条件规定,但必须具备板前

手操功能。如同时具有板前手操和电操方式,则两者之间应能灵活、方便、可靠的转换。操作力不应超过540N。

控制板的框架一般采用薄钢板(一般 $\delta=3\text{mm}$)弯制。必要时应对框架进行刚度校核及应力分析。保证在相关规范规定的冲击条件下构件无损坏、变形。焊接接头尽量采用榫式结构,同时应避免焊缝集中,以减少应力集中及残余应力的作用。焊接接头处一般应留1mm间隙。应尽量采用冲压件或折边零件代替焊接件以减少焊缝的数量,对于非主要受力的构造焊缝尺寸应减至最小;另外,设计上应尽量采用母材直接受力的结构,使工作焊缝转为构造焊缝;焊缝位置尽可能位于构件的中性轴或对称布置。钢板结构或角钢结构对接处应有加强筋板。

控制板应设置坚固的与带电体绝缘的扶手,如控制板需要门,在门应能在不小于90°角度内灵活开闭,且应设置机构使门关上门后不会振动,如装有门锁,各门应能用同一把钥匙打开。

控制板应有可靠的单点或多点接地,接地处应搪锡并有明显接地标志。接地螺钉的最小尺寸应不小于表5.2-20的规定。

表 5.2-20 接地螺钉的最小尺寸	
舰用电器的约定发热电流 (A)	接地螺钉最小尺寸 (mm)
$I_{th} < 20$	M4
$20 < I_{th} \leq 200$	M6
$200 < I_{th} \leq 630$	M8
$630 < I_{th} \leq 1000$	M10
$1000 < I_{th}$	M12

6.4 船舶电力推进集控装置结构

推进集控装置主要实现对推进系统及其控制设备的隔舱监测和控制的功能。

推进集控装置一般由推进集控台、集控柜、传令车钟、执行继电器箱、模拟显示屏等设备组成。

6.4.1 总体设计

大型台(柜)宜采用分体式结构,推进集控台采用积木式结构,集控柜采用可拆式分体结构,较重的部件放在台(柜)的下方,以降低台(柜)的重心增加其稳定性。

集控台外壳的防护等级至少应为IP20,台面部分至少应为IP40。

集控台的骨架及整体结构,应有足够的机械强度,能经受船体振动及公路运输而不损伤,外壳一般采用厚度不小于1.2mm的优质冷轧薄钢板制成。

集控台吊装件应有足够的强度,其安装位置应保证吊装时不至引起集控台的永久变形和损坏。

6.4.2 热设计

推进集控装置的热设计可采用自然散热与强迫通风冷却相结合的方式。

计算机及扩展机箱采用强迫风冷,以降低计算机及外围关键接口电路的温升,提高控制系统核心的可靠性。

车钟采用导板传热的散热方式。

显示器采用敞开式自然散热冷却方式。

6.4.3 防潮、防霉、防盐雾设计

对系统的核心部件计算机及接口扩展箱可采用密封型的加固结构,车钟、遥控设备、执行继电器箱采用密封型结构

(盖及螺钉的缝隙用胶密封),对印刷电路板采用三防处理,使电子器件形成与外界完全隔离的独立整体,对组成设备的构件采用喷涂、浸渍、电镀等方法在其表面涂覆防潮绝缘漆,以提高整个设备防霉、防水能力。

6.4.4 人机工程

传令、回令及转速等重要参数用数字指示器作指示,减少因读数而引起的误差。

对推进电动机的监测(电流、电压)电表集中布置在台上方面板上,并倾斜一定角度,以利于观察读数;温度越限、故障报警等集中布置,采用红色指示灯作指示,并伴有报警声音。

控制旋钮布置在操作方便的最佳控制区内并且各控制旋钮的方向应一致。

操作按钮(如键盘等)应布置在最佳控制区内,并设立必要的机械互锁,以免误动作。

6.4.5 维修性设计

设备之间及设备内部可拆卸部件之间宜采用接插式连接,以方便维修和拆卸。

设备内导线采用颜色和符号作标志。

所有台、柜、箱均应无尖锐的棱角,高压进出线加盖保护,远离需维护的部件,并在其附近设置警戒标志。

6.4.6 安全性设计

为防止维修过程中出现人身伤害和设备损坏,应将系统检测的高压信号统一布置在集控台的上部。

交流进线电源集中布置在集控柜的下部,并有明显的标记。

所有设备均应设有安全接地措施。

6.4.7 集控台的外观:

集控台表面应平整,边缘及开孔应光滑,无毛刺、裂口。

所有焊接处应均匀、牢固、无明显变形或焊损缺陷。

各零部件应配合正确,门、抽屉等活动件应工作灵活,紧固件、连接件应牢固无松动。

标牌应正确、清晰、易于识别、安装牢固。

内外表面涂覆应符合相关规定。涂层应牢固,色泽均匀,表面平滑,不应有起翘和脱落现象。

7 船舶电力推进试验

船舶电力推进装置是驱动螺旋桨使船舶在水中运动的全部用电设备的总称。

为了保证推进装置各设备和装置所属设备集成(成系统)后满足技术规格书的要求,各设备总装完成后分别按产品的试验大纲,进行单个设备的试验检查。合格后,全部船舶电力推进装置要进行陆上联调试验,装船后的系泊试验和航行试验。

7.1 船舶电力推进装置设备试验

7.1.1 船舶电力推进装置中各设备

船舶电力推进装置中各设备参见本篇其他章节。

7.1.2 设备的检查试验

设备为证明本产品的所有性能指标都符合技术规格书(技术条件)的要求,均应进行检查试验,主要包括以下内容(设备性质不同,可以裁减或补充)。

- (1) 设备内所装器件是否是检验合格的产品。
- (2) 检查接线和端子符号正确性。
- (3) 检查设备的电气间隙和漏电距离(见表 5.2-21)。

表 5.2-21 电气间隙和漏电距离

	60~250V	250~640V	>660V
电气间隙 (mm)	15	20	25
漏电距离 (mm)	20	30	35

(4) 测量设备的绝缘电阻。

1) 主电路(>500V)正负极之间的带电导体与接地框架之间的绝缘电阻换算到 25℃时,其值不小于 6MΩ。

2) 控制电路(60~500V)带电导体与接地的框架之间的绝缘电阻换算到 25℃时,其值不小于 3MΩ。

3) 信号电路(<60V)带电导体与接地的框架之间的绝缘电阻换算到 25℃时,其值不小于 1MΩ。

(5) 检查设备的机械联锁和电气联锁。

(6) 检查过载和短路保护整定值。

1) 过载。

a. 推进电机。

i) 过载整定电流值。主要考虑电机过载能力和延时器件的整定误差

$$I_G = 1.5 I_H \times (1.1 \sim 1.15) \quad (5.2-33)$$

式中: I_H 为蓄电池组平均电压时,推进电机小时工况(额定)电流值; I_G 为推进电机过载保护整定值。

ii) 过载整定时间。根据电机过载能力和实船需要,还应考虑分级保护原则确定。

iii) 返回电流和整定误差。一般要求返回电流尽量远离额定(基本)工况电流,接近整定电流,整定误差越小越好。

b. 蓄电池组。

i) 过载整定电流值。为了保证选择性,一般其整定值比推进电机断路器增加 10%。

ii) 过载整定时间。一般蓄电池组断路器延时时间比推进电机断路器长 2s 左右。

iii) 返回电流和整定误差。其要求与推进电机断路器相同。

2) 短路。

a. 推机电机。

i) 短路整定电流值

$$I_K = (1.2 \sim 1.25) K I_H \quad (5.2-34)$$

式中: K 为推进电机允许的起动(或反转)电流倍数,一般 $K=1.5 \sim 3.5$; I_K 为推进电机短路整定值。

ii) 断路器的极限分断。根据电路图,计算出短路时流经断路器的最大电流和最高工作电压,进行分断试验验证。

iii) 断路器的电动力稳定和热稳定。在极限分断试验中,同时校核了电动力稳定和热稳定。

b. 蓄电池组。

i) 短路整定电流值。蓄电池组除考虑推进电机起动及反转峰值外,还应考虑辅机等设备的供电电流。通常比推进电机断路器整定值增加 15%~20%。

ii) 断路器的极限分断。根据计算出短路时流经断路器的最大电流、断路器工作回路最高电压,进行分断试验验证。

iii) 断路器的电动力稳定和热稳定。在极限分断试验中,同时校核了电动力稳定和热稳定。

(7) 可借助辅助设备检查设备的线路正确性。

(8) 温升试验。

设备在温升可能最高工况下,进行通电检查其实测温升。

(9) 耐压试验。

在温升试验结束后,根据不同回路施加不同等级的50Hz交流电压,历时1min,应无击穿或闪络现象。

(10) 检查设备的质量。

7.1.3 设备的型式试验

7.1.3.1 型式试验在下列情况下进行

(1) 首次制造的产品。

(2) 产品结构、工艺过程或材料改变而足以影响产品性能时。

(3) 检查试验中,发现产品的质量有问题而必须经型式试验考核才能作结论时。

(4) 批量投产后,每三年进行一次,停产以后的第一批产品需进行型式试验。

(5) 军方要求并与厂家商定认为有必要时。

(6) 型式试验样品一台。

7.1.3.2 型式试验

型式试验除包括检查试验全部内容外,还须进行如下项目的试验。

(1) 寿命试验。所有传动部分均要按技术规格书(技术条件)的要求进行操作。

注:被传动的开关不带电操作,传动部分允许加润滑油(脂)。

(2) 寿命试验后进行温升试验。

(3) 湿热试验。湿热试验后,测量绝缘电阻,并进行降低电压的耐压试验,同时还须检查外观。

1) 检查金属件和铸铁件的油漆。

2) 检查电镀件和化学处理件的外观。

3) 检查塑料件的外观。

(4) 霉菌试验。

(5) 盐雾试验。

(6) 电磁兼容性测量。

(7) 冲击振动试验。

7.2 船舶电力推进装置的陆上联调试验

7.2.1 陆上联调试验的目的

(1) 船舶电力推进装置单个设备符合本身的技术规格书后,在陆上(试验室)按系统要求安装接线后,可进一步检查设备的功能、性能,并发现问题或缺陷。

(2) 通过系统动态过程的试验检查各设备在动态时的动作是否协调一致。

(3) 检查各设备之间的接口(机械和电气)的正确性,参数的协调、匹配性。

(4) 确定船舶电力推进装置是否可以装船。

7.2.2 陆上联调所含的被试设备

(1) 电源部分:给电力推进装置供电的设备。

(2) 推进设备:推进电机及辅助设备。

(3) 控制及调速部分:控制板、起动设备及调速设备。

(4) 传感器部分:将推进装置相关物理量变成电量的元器件或设备。

(5) 测量部分:将推进装置相关物理量由指示仪表或显示器显示。

(6) 保护单元:船舶电力推进装置应有过载、短路、过电压、低电压、逆功率,滑油压力低,温度过高,冷却水温度过高,绝缘电阻低等保护,另外,还应该有机电联锁和电气联锁。

(7) 自控设备:将对推进装置的命令变成模拟量或数字

量,送执行器件执行。

(8) 减振、降噪部分:主要包含减小振动和降低噪声的设备和采取的主要措施。

注:由于船舶的性质、使命不同,陆上联调试验所含设备可以增减,甚至不做陆上联调试验。

7.2.3 电力推进装置陆上联调被试设备的技术状态

(1) 单个设备必须是按其自身的检试大纲试验合格的产品。

(2) 部分成套设备必须是经局部配套试验通过的设备。

7.2.4 电力推进装置陆上联调陪试设备

(1) 场地设备必须经过检验,处于良好状态。

(2) 模拟螺旋桨负载经过检查,处于良好状态。

(3) 与电力推进装置有关的其他设备,经过检验,符合自身技术规格书的要求。

7.2.5 静态检查

(1) 各设备按自生的说明书进行自检,合格。

(2) 检查设备安装的质量和正确性,符合要求。

(3) 检查电力推进装置内部的连线和电力推进装置与联调场地与之有关设备的接线正确。

(4) 用不同电压等级的兆欧表分别测量不同电压等级回路的绝缘电阻,符合要求。

(5) 与电力推进装置有关的设备均经过检验,处于良好状态。

7.2.6 静态调试

推进电机主回路不通电,使推进电机处于静止状态,其他回路均按要求通以规定的电源电压。

7.2.6.1 机旁手操方式的静态调试

(1) 检查控制设备的联锁,安全保护,指示和信号显示的正确性。

(2) 检查多种线路组合方式转换的正确性、可靠性。

(3) 检查多回路供电电源的转换正确性,可靠性。

7.2.6.2 集控室静态调试

(1) 集控室电操方式静态调试。

1) 各操作开关的检查。

2) 与机旁手操设备的对接调试。

3) 与推进电机调速设备的匹配性检查。

4) 报警功能的检查。

5) 车钟功能的检查。

6) 船舶电力推进装置附属设备控制及检测功能的检查。

(2) 集控室自动方式的静态调试。

1) 各通道动作正确性的检查。

2) 模拟信号电路的检查。

3) 计算机自检,并检查各功能键功能的正确性。

4) 集控室自动控制静态调试。

5) 与推进装置相关设备的参数匹配调整。

7.2.7 动态调试

(1) 多种供电方式和多种供电电压等级的线路连接转换。

(2) 推进电机的起动与运行的检查。

7.2.8 负载试验

(1) 分别在机旁手操、集控室电操和自控方式下进行推进电机的正向起动和正向运行试验。

(2) 分别在机旁手操、集控室电操和自控方式下进行推进电机的反向起动和反向运行试验。

(3) 推进装置部分设备故障时,推进电机起动和运行试验。

7.2.9 推进装置的特种试验

(1) 推进电机的噪声测试。

(2) 在推进装置多种工况中选几个有代表性的工况测量系统的电磁兼容(系统应自兼容)。

7.3 船舶电力推进装置的系泊试验

7.3.1 系泊试验的目的

(1) 船舶电力推进装置集成(成系统)装船后,在码头上进一步检查设备的功能、性能,并可发现非装船试验无法发现的问题或缺陷。

(2) 检查各设备之间的接口(机械和电气)的正确性,参数的协调、匹配性。

(3) 确定船舶电力推进装置全部设备是否符合系统技术规格书的要求。

(4) 确定船舶的电力推进装置是否可以进入航行试验。

7.3.2 系泊试验所含的被试设备

(1) 电源部分:给电力推进装置供电的设备。

(2) 推进设备:推进电机及辅助设备。

(3) 控制及调速部分:控制板、起动设备及调速设备。

(4) 传感器部分:将推进装置相关物理量变成电量的元器件或设备。

(5) 测量部分:将推进装置相关物理量由指示仪表或显示器显示。

(6) 保护单元:船舶电力推进装置应有过载、短路、过电压、低电压、逆功率、滑油压力低,温度过高,冷却水温度过高,绝缘电阻低等保护,另外,还应该有机电联锁和电气联锁。

(7) 自控设备:将对推进装置的命令变成模拟量或数字量,送执行器件执行。

(8) 减振、降噪部分:主要包含减小振动和降低噪声的设备和采取的主要措施。

注:由于船舶的性质、使命不同,系泊试验所含设备可以增减。

7.3.3 静态检查

(1) 各设备按其自身的说明书进行自检合格。

(2) 检查设备安装的质量和正确性。

(3) 检查各设备间的连线是否正确。

(4) 分别测量不同电压等级回路的绝缘电阻。

(5) 与船舶电力推进装置有关的设备均经过检验,处于良好状态。

7.3.4 静态调试

推进电机主回路不通电,其他回路均按要求通以规定的电源,这一状态与实际运行仅差推进电机的不转动。

7.3.4.1 机旁手操方式静态调试

(1) 检查控制设备的联锁、安全保护指示和信号显示的正确性。

(2) 检查多种线路组合方式转换正确性、可靠性。

(3) 检查多回路供电电源的转换正确性、可靠性。

7.3.4.2 集控室静态调试

(1) 集控室电操方式静态调试。

1) 各操作开关的检查。

2) 与机旁手操设备的对接调试。

3) 与推进电机调速设备的匹配性检查。

4) 报警功能的检查。

5) 车钟功能的检查。

6) 船舶电力推进装置附属设备控制及检测功能的检查。

(2) 集控室自动方式的静态调试。

1) 各通道动作正确性的检查。

2) 模拟信号电路的检查。

3) 计算机自检,并检查各功能键功能的正确性。

4) 集控室自动控制静态调试。

5) 与推进装置相关设备的参数匹配调整。

7.3.5 动态调试

7.3.5.1 机旁手操方式的动态调试

(1) 多种供电方式和多种供电电压等级的线路连接转换。

(2) 推进电机的起动与运行检查。

(3) 推机电机的反向起动与运行检查(如果场地不具备条件可以不做)。

7.3.5.2 集控室电操(自动方式的动态调试,检查不同工况下的速度调节)

7.3.6 负载试验

(1) 分别在机旁、集控室电操和自控方式下,进行推进电机的正向起动和运行试验。

(2) 分别在机旁、集控室电操和自控方式下,进行推进电机的反向起动和反向运行试验(如果场地不具备条件可以不做)。

(3) 推进装置部分设备故障时,推进电机起动和运行试验。

注:由于推进电机装船后,其负载是螺旋桨,因此,推进电机系泊试验能运行到什么工况须视码头缆桩承受拉力确定。

7.3.7 推进装置的特种试验

(1) 推进电机的振动测试。

(2) 推进电机的噪声测试。

(3) 推进电机的电磁兼容测试(系统应自兼容)。

7.4 船舶电力推进装置的航行试验

(1) 根据电力推进分系统系泊试验大纲,完成系泊试验未进行的项目试验。

(2) 进行电力推进分系统全部工况的航行试验。

(3) 配合总体和其他系统所需的其他航行工况试验。

第3章 船舶推进电机

1 船舶推进电机的特点和要求

1.1 推进电机的特点

船舶电力推进系统的主要动力源是推进电动机,推进电动机的运行特性由船舶性能要求确定。船舶的航速和推进轴功率的变化范围很大,船舶对推进电动机的要求决定了推进电动机的特点,是一种高可靠性、大容量、低转速、高转矩、高比功率、功率和转速变化范围很宽的多工况电机。

(1) 高可靠性。推进电动机是船舶电力推进系统的主要、甚至是惟一的动力源,其可靠性直接关系到船舶的安全航行。特别是潜艇推进电机,原来潜艇采用柴油机与推进电机同轴推进,而且有多台主推进电机和多台经航航行推进电机。而现在仅仅设一台主推进电机,推进电机成为了潜艇深潜、上浮、航行的唯一推进动力,它必须具有非常高的可靠性,以保证船舶的生命力。

(2) 大容量。船舶推进电动机的最大功率取决于船舶航行所要求的最大航速、排水量、运动阻力和推进螺旋桨的特性,一般由船舶总体设计时决定。推进电机的功率大致与螺旋桨转速的立方成正比,即 $P = k \cdot n^3$ (k 为常数),因此,提高船舶的航速要求显著增加推进电机的功率。

随着船舶的排水量增大,航速增高,所需推进动力越来越大,导致推进电机的容量也逐步增大。现代船舶已由双螺旋桨推进发展为单桨推进,单台推进电机的容量成倍的增加。

(3) 低转速、高转矩。较早期的船舶螺旋桨为小直径高速螺旋桨,为提高螺旋桨推进效率和降低噪声,现均采用低速大直径螺旋桨。而一般推进电机与螺旋桨同轴连接,无齿轮减速,所以推进电机转速向低速发展,单台推进电机的容量大幅度增加,推进电机的转矩也大幅度提高。

(4) 高比功率。船舶舱室空间和排水量有限,希望设备体积、质量尽量轻巧,推进电机在船上属于大型设备之一,特别是潜艇推进电机一般放置在船舶的尾部。现代潜艇为了提高流体力学和声学性能,趋向于采用水滴型尾部收缩,导致舱室体积变小,所以要求推进电机体积小、质量轻,比功率高。

要求最小的外形尺寸和质量,是与电机便于维护以及某些部件便于接触常常直接相矛盾的;但是对于船舶推进电机来说,最小的外形尺寸和质量是优先考虑的。

(5) 宽调速范围和调速性能。推进电机要能满足船舶航行的全部航速需要。转速一般在每分钟几十转到每分钟几百转。在同样输出功率时,它与一般恒速的电机和有转速中断区的调速电机相比,实际分担的功率、电负荷和磁负荷都要大得多。

(6) 高效率。电机的效率对船舶的燃料消耗、主发电机外形尺寸和质量有很大的影响。推进电机效率低,总的电力消耗加大会使主发电机的容量,以及燃料的消耗、主发电机外形尺寸和质量显著地增加。

特别是潜艇推进电机的效率直接影响潜艇的续航力和作

战半径。

(7) 振动和噪声小。船舶推进电机通常是安装在很小的房间内,在那里长期工作人员将因电机的不间断的噪声所困扰。因此改善工作人员的维护居住条件,减小电机的噪声是很重要的。

对于特殊船舶如测量船、海洋考察船,推进电机的振动和噪声会干扰测量的精度。

随着声纳等反潜技术的发展,需要研究发展安静型潜艇。潜艇低速航行时,推进电机是其主要振动和噪声源,对潜艇的隐蔽性影响很大,尤其影响了潜艇的战术技术性能指标。因此,根据船舶发射到水中的声能值的限制,对潜艇推进电机振动和噪声的要求越来越高。

必须指出,要求振动噪声小是与限止外形尺寸和质量直接相矛盾的,因为电机的有效材料利用率越高,即电机的电磁负荷和转速越高,电机的噪声越大,要得到噪声小的电机,必须减小电机的电磁负荷和转速,这样经常要增加外形尺寸和质量。

(8) 多工况运行。推进电机要推动船舶在不同的航速下前进、后退,应能满足多种工作状况运行要求。

潜艇推进电机一般有基本、短时和连续三种工作制。基本工作制是水下航行的短时工作状态,也是电机的额定工况,一般为1h。短时工作制可以使潜艇操纵更加灵活、机动,有利于接近敌人、占领有利阵位和规避以应付各种不利的局面,一般为10min工况。连续工作制满足潜艇水面、水下、通气管航行、倒车等状况下的各种航速。

(9) 多电压供电方式。潜艇推进电机一般由蓄电池幅压供电。由于蓄电池的放电特性,供电电压波动范围很大,推进电机在同样输出功率时,与一般电机相比,它的电负荷和磁负荷较大。

1.2 船舶推进电机分类

1.2.1 按电机用途分

按电机用途分为水面船舶推进电机、潜艇推进电机。

1.2.2 按电机功能分

(1) 主推进电机。是船舶电力推进系统的主要,甚至是惟一的动力源。能满足船舶航行的全部航速。

(2) 经航推进电机。潜艇水下低速航行工况时使用。连续工作制,功率不大,电枢电流小,蓄电池放电电流小。

(3) 应急推进电机。当船舶电力推进系统的主要动力源发生故障时,作为应急推进用。

(4) 巡航推进电机。为满足某些特殊用途船舶的要求,在船舶低、中速航行时所采用的推进电机。

(5) 辅侧推进电机。驱动船舶侧向推进器的推进电机,在船舶中起辅助推进作用。

1.2.3 按电机类型分

(1) 直流推进电机。因其具有调速、过载、起动和运行等性能良好,在潜艇电力推进系统中至今仍占统治地位。为适应形势发展的需要,正不断改进设计,采用新技术、新结构、新工艺、新材料,以提高推进电机性能。有单枢单换向

器、单枢双换向器、双枢双换向器、双枢四换向器等。

(2) 交流推进电机。电力电子技术和控制技术的飞速发展,使得交流调速性能可以与直流调速相媲美、相竞争。交流电机已有逐步替代直流电机推进电机的趋势。有绕线转子异步推进电机、笼型异步推进电机、同步推进电机等。

(3) 永磁推进电机。伴随着永磁材料和交流调速的发展,永磁推进电机以其明显的优势展示在世界海洋上。永磁推进电机在德国 212 潜艇、俄罗斯“阿莫尔”号潜艇上的成功应用,以及美国、英国、法国等各国在实用化研究上的硕果累累,有力地证明了它是近中期首选的动力装置,是船舶直流推进电机的更新换代产品。永磁推进电机按气隙磁通方向,可以分为径向磁通永磁电机、轴向磁通永磁电机和横向磁通永磁电机。按电枢绕组反电动势波形,可分为正弦波永磁电机和方波(梯形波)永磁电机。

(4) 超导推进电机。因为高温超导材料的发展,引起世界各国的青睐,是中远期可提供高效、大功率动力的推进电机。超导推进电机有超导单极电机、超导同步电机,超导异极电机(即超导换向器式直流电机)、特种超导电机等。其中超导单极电机、超导同步电机具有一定的研究基础,较为成熟,超导同步交流电机前景更好。

在船舶电力推进中交流推进电机占主导地位,目前是异步推进电机、同步推进电机和永磁推进电机并存的局面。在潜艇电力推进中直流推进电机目前占主导地位。

1.3 船舶推进电机的要求

对推进电动机的要求,除推进电机的特点所决定外,同时要考虑船舶的使用环境条件,如海水、盐雾、霉菌等,运行技术状态,如倾斜、摇摆和冲击的影响等,还要考虑舱内的布置、外形结构尺寸小、质量轻等要求。推进电机的基本要求如下:

(1) 可靠性高。对电机可靠性高的要求是一个综合性的概念,它可决定该电机的许多结构特点。电机的可靠性高通常可以作如下理解:

1) 电机可以长期不间断地工作,维护时不长期停止工作,即更换电机的需维修的零部件,如直流推进电机的电刷、机电一体化推进电机的功率模块,更换轴承润滑油以及清除电机上的灰尘时也不长期停止工作。

2) 推进电机安装在船舶上,要求所有最重要的结构部件可以方便的定期维护。

3) 绕组绝缘的耐潮性和耐水性。在正常海洋空气湿度的作用下,电机仍能保持良好的绝缘性能。即使被海水浸没的电机在海水从舱中排出后,电机用淡水洗涤,并经短期烘焙干燥后,仍能短期工作。

4) 电机的机械强度,即承受正常操作时以及船舶执行任务时所产生的机械应力的能力,能承受较大的冲击震动。

5) 保证电机在横倾和纵倾、横摇下能可靠的工作。

6) 电机脱离辅助机械的独立性,即在有限的时间间隔内,电机不因辅助机械(如风扇、供轴承油的油泵以及其他辅助机械)的不正常而丧失了其独立工作能力与生命力。

7) 保证电机冷却系统安全运行。

(2) 推进电动机最好采用强迫通风,以减小体积和质量,以避免在船舶制动或倒车时过热。对于功率过大电机也可采用水内冷式。

(3) 视船舶条件不同,可以用单独通风系统,也可用总的通风系统,但最好采用单独的通风系统。

(4) 具有强迫通风的电机,应在不用强迫通风时也能承

受低负载运行。

(5) 为了防止电机停车后在内部凝水,以及提高电机绝缘,电机内部应装电热器,使电机内温度保持比周围介质温度高 2~3℃。为此目的,也允许使用电机的励磁绕组来作加热器。

(6) 推进电机的绝缘电阻,在耐电压试验前、后测量,测得的绝缘电阻值修正到 25℃ 时(按照温度每减少 15℃,绝缘电阻增加一倍进行修正),应不低于下列数值:

1) 磁场绕组(B、F、H 级绝缘): 50MΩ。

2) 电枢回路(B、F、H 级绝缘): 25MΩ。

3) 电加热器: 25MΩ。

(7) 电机应能承受超速运行的考验。电机应能承受 125% 额定转速,空载超速运行 5min 而不发生损伤或有害变形。当 125% 额定转速小于 120% 最高工作转速时,应按 120% 最高工作转速进行试验。

(8) 逆转。对可逆转电机,应能在产品技术规格书规定的逆转工况下正常运行。

(9) 电机应采取有效措施防止轴电流对轴承产生危害。一般轴电压的峰—峰值不应超过 1V。如果轴承已电气绝缘,轴电流回路被断开,则允许有较高的轴电压。

当采取轴承绝缘措施时至少应将电机的非驱动端轴承加以电气绝缘,与绝缘轴承连接的金属油管、金属冷却管和其他导电连接件均应电气绝缘。

(10) 推进电机的轴承和润滑,在电机允许的倾斜范围内,应保证轴承良好地润滑和工作。润滑油(脂)不能从轴承中渗漏或溢出。

(11) 推进电动机应尽量采用滑动轴承。

(12) 当推进电动机采用滚动轴承时,应考虑:

1) 在船舶上能顺利地更换滚动轴承。

2) 设置轴承加油杯(孔),并设置排油道;正确选用润滑脂,以保证轴承良好地润滑。

3) 滚动轴承的使用寿命应不少于 20 000h。

(13) 当推进电动机采用滑动轴承时,应考虑:

1) 在明显部位应设有轴承温度测量、油面高度观察以及超温报警装置。

2) 若采用压力润滑时,必须保持足够的油压或油面高度,以保证不断油。若采用飞溅式滑动轴承时,应设轴承加油杯(孔),以便补充润滑油。

3) 采用滑动轴承的推进电机,必须设有转子提升装置,以利于更换轴承轴瓦。

(14) 推进电动机转子的直径应尽可能小,以减小转动惯量,减少反向或调速时的过渡时间,提高机动性。

(15) 在必要的情况下,应安装推进电动机的超速保护,以防止在操纵和故障条件下时超过电机设计的速度极限。

(16) 在规定的运行模式和紧急操纵模式下,再生电力不应引起推进系统的任何报警。

(17) 推进电机励磁电路保护不应引起开路,除非电枢电路同时断开。

(18) 对于具有一个励磁绕组或者两个电枢绕组的电机,一个电枢电路的故障不应引起励磁电路的断路。

(19) 应有检测电机内部温度和轴承润滑的信号装置,其信号应在操纵板上反映出来。

(20) 由静止式变流器供电的推进电动机,在设计中要考虑电源中谐波的影响。

(21) 电机排在舱室中热量的导出。船舶舱室空间很受限制,大容量推进电机所排出热量对船上的居住条件以及维

护人员正常工作条件的影响很大。因此电机排在舱室中热量的导出很重要。船舶推进电机一般使用带有水冷式空气冷却器的闭式循环通风冷却系统,或水冷系统。

(22) 满足船用条件使用要求。船舶推进电机必须防潮、防霉、防盐雾。

2 船舶推进电机的设计和结构

2.1 船舶推进电机的设计

2.1.1 船舶推进电机的设计程序的确定和阶段的划分

船舶推进电机设计以工程为主,将预研成果和成熟的技术转化为适用的产品,最终达到设计定型和生产定型的全过程。

推进电机设计研制工作阶段可分为:①论证阶段;②方案阶段;③设计研制阶段;④产品试制阶段;⑤设计定型阶段。

每个阶段的工作,在达到本工作程序规定要求后,方可转入下一阶段工作。但上级或委托单位按阶段下达或委托任务,则可从下一阶段开始工作。一般不得超越阶段进行。应尽量应用已掌握的技术,不应采用未经验证的新结构、新工艺和未经鉴定的新材料。

(1) 论证阶段。本阶段必须确定船舶总体和动力系统对推进电机的技术要求,明确技术性能、技术指标和要求,对委托方提出的各项指标和要求进行可行性论证,在论证阶段中需收集国内外有关资料信息,经分析、比较,在此基础上编写可行性论证报告。

(2) 方案阶段。本阶段应根据批准的“技术任务书指标”和“技术协议书”进行研制方案论证。在对推进电机性能、结构、可靠性、可加工性、可维修性、安全性以及经费的综合分析基础上,通过多方案比较,选出最优方案,初步确定关键件(特性)、重要件(特性);确定在设计时不允许擅自改变的基本尺寸和结构形式,提出关键零部件和明确试验研究课题,开展课题研究,并按方案论证要求提供所需文件与图样。

内容应包括:

- 1) 推进电机研制任务书。
- 2) 方案论证报告。
- 3) 课题研究试验大纲和研究试验报告。
- 4) 可靠性保证大纲和可靠性论证报告。
- 5) 标准化大纲。

(3) 设计研制阶段。根据方案阶段经评审批准的“研制任务书”和有关技术文件以及课题试验研究结果着手编制产品技术规格书,进行精确的技术设计与施工设计,提供完整的技术文件和工作图,成为生产制造和质量控制的依据,并准备设计评审。内容应包括:

- 1) 推进电机全套工作图样及技术文件。
- 2) 推进电机主要和特殊材料表(此工作应该在施工设计前完成)。
- 3) 提出外购件清单,重要锻件毛坯图以及验收的技术要求。
- 4) 提出关键(重要)件明细表。
- 5) 设计专用工具及工具箱和备件箱图样。
- 6) 完成可靠性设计、计算,完善可靠性保证大纲,编制可靠性设计报告。
- 7) 完成电磁计算和机械计算以及设计说明书。
- 8) 编制技术规格书。

(4) 产品试制阶段。本阶段是验证设计的可加工性,物化具体产品的阶段,是验证设计、试制是否正确,能否达到预期质量指标和经济效益阶段。

本阶段应密切配合试制工作并完成使用维护说明书(含完工图、履历表)和协同试制单位提供合格器材单位名单。

(5) 设计定型阶段。设计定型是国家对产品性能进行全面考核的主要形式,以确认其达到《研制任务书》和有关《合同》要求的阶段。

工作内容包括:

- 1) 按照定型试验大纲,配合作设计定型试验。
- 2) 按照任务书和合同质量评审。
- 3) 修改工作图样与技术文件,提供与样机完全一致的工作图样与技术文件。
- 4) 修改、补充、完善可靠性保证大纲和可靠性设计报告,提交可靠性评估报告。
- 5) 编写设计总结。
- 6) 提出设计定型申请报告。

2.1.2 推进电机计算

推进电机设计计算包括以下内容:

(1) 推进电机电磁计算。电机的电磁计算与它的结构是密切联系在一起的,所以计算时必须考虑推进电机的结构特点。

推进电机计算的原始数据是由技术规格书给定的,如电动机型式、船舶航行的功率特性、调速范围、各种工况的功率以及电动机的外形尺寸。

推进电机设计在满足性能指标前提下,质量、体积和效率力求达到国际同类产品先进水平。

(2) 推进电机的电磁场计算。推进电机的电磁场计算在于掌握电机内磁场分布,以提高电机设计的合理性、可靠性和经济性。

(3) 推进电机机械计算。由电磁计算求得的电机有效部分的尺寸,从保证足够的机械强度观点出发,一定要进行核算。

(4) 推进电机通风发热计算。推进电机的通风计算在于确定电机通风所需的风量和该冷却风量通过电机所需的传递压力值。

推进电机的发热计算在于确定电机各部位的温升,应使温升不超过标准允许值。

由于电机各部分散热系数随电机结构、绝缘材料、散热表面的尺寸和通风系统不同而异,通常确定电机温升可根据每一个一定类型电机的试验数据用类比方法求解取得近似值。

(5) 推进电机定子固有频率计算。进行推进电机定子固有频率的计算是为了掌握该频率与电机齿频的差距,以避免破坏性的电机共振产生。

2.2 船舶推进电机的结构

2.2.1 船舶推进电机的结构分类

船舶推进电机的结构型式可以按机壳的防护性、传动方式、转轴轴线的布置以及冷却系统分类。

(1) 按推进电机机壳的防护形式分类:

1) 防护式。防护式电机机壳和端盖上的所有孔都有保护网或百叶窗遮住,以防止其他物体掉入电机内部。

2) 防滴式。防滴式电机能防止水滴与水平线成 45° 内掉入电机内部。

3) 防水式。防水式电机的内部应该很可靠地防止水流

的影响。这要求在将水流在2个大气压下距离5m从直径25mm的软管中对电机作冲击试验检查时,在任一方向冲击5min内水不应该进入电机内部。

同时必须注意试验防水性能时,标准螺栓连接不应该渗透进水。因此,螺栓连接必须用特殊紫铜垫圈或用其他方法密封。

4) 密闭式。即电机能够沉入水中长期工作,在此状态下没有水渗入电机内部。同样的密闭式电机应该能防止周围大气压中的蒸气或煤气渗入电机内部。

必须强调指出,对于有转轴轴伸的电机,无论在任何密封结构下,绝对的密封性是不可能达到的。

主推进电机采用开式冷却时,除风管接口外,上半部最低为防滴式,下半部最低为水密式B;采用闭式冷却时,除风管接口外,上半部最低为全密封式,下半部最低为水密式B。

经航电机一般为防滴式:与推进轴成一直线安装的经航电机,除风管接口外,其上半部最低为防滴式,下半部最低为水密式B。

辅助推进电机的防护型式,根据船上安装位置按需要选择,最低为防滴式。

(2) 按推进电机安装和传动方式分类。

1) 卧式。推进电机转轴轴线平行于水平面。

2) 立式。推进电机转轴轴线垂直于水平面。

3) 倾斜式。推进电机转轴轴线倾斜于水平面。

推进电机安装形式和传动方式决定电机轴承的结构。传动方式,即弹性或刚性联轴器,齿轮传动或皮带传动,其本身特点不仅表现在传动转轴轴伸的尺寸上,而且表现在承受传动应力的传动端的轴承结构上。这些应力可以是径向、轴向,也可能是其他形式。因此,对于转轴轴伸的布置传动方式应该在设计电机时正确地确定。

2.2.2 船舶推进电机的结构

推进电机由电机本体及其辅助设备组成。

(1) 辅助设备一般包括风机、风机电动机、冷却器、空气过滤器、加热器等。辅助设备可按需增删。

(2) 不同的推进电机本体组成不同。

1) 直流推进电机电机本体组成:

a. 定子。含机座、端盖、刷架、磁路系统、出线盒等。

b. 转子。含电枢铁心、轴、绕组支架、电枢绕组、换向器、风扇等(对主推进电机采用强迫通风冷却,不采用风扇,另外安装通风机)。

c. 轴承。通常用滑动轴承。

2) 交流流推进电机电机本体组成:

a. 定子。含机座、端盖、电枢铁心、电枢绕组、出线盒等。

b. 转子。含轴、支架、磁路系统、风扇等(对主推进电机采用强迫通风冷却,不采用风扇,另外安装通风机)。

c. 轴承。通常用滑动轴承。

3) 永磁流推进电机电机本体组成:

a. 定子。含机座、端盖、电枢铁心、电枢绕组、出线盒等。

b. 转子。含轴、支架、磁路系统、永磁磁极、风扇等(对主推进电机采用强迫通风冷却,不采用风扇,另外安装通风机)。

c. 轴承。通常用滑动轴承。

2.2.3 船舶推进电机的结构设计

船舶推进电机的结构设计应满足下述基本要求:

(1) 轴承应能保证在所有工况下的正常润滑,并在所有

规定的倾斜工况下保证润滑油的可靠密封。轴承的止推面应能承受纵倾时电机转子和联轴器质量的轴向推力。

(2) 轴瓦应能在舱室内更换。

(3) 轴计算时应考虑到推进轴系扭转振动引起附加应力的最大力矩和逆转时可能承受的力矩。

(4) 换向器应允许多次加工而不损坏其机械强度。所有电刷应能检查和更换。

(5) 电机通风系统应在最小的通风机功率消耗的情况下保证电机各部分必须的冷却。

(6) 为了减轻质量,应最大限度地用机加工手段减轻质量并尽可能采用轻金属和合金。

(7) 防止轴电流。电机应设计成轴与轴承之间无破坏性电流。电机因磁的不平衡等引起的轴电压峰—峰值一般应不超过1V,如果设计时已考虑轴承的电气绝缘,则允许有较高的轴电压。

(8) 当采取轴承绝缘措施时,则至少应将非驱动端轴承加以电气绝缘,与该绝缘轴承相连的油管和其他导电连接体也均应予绝缘。

(9) 当采取轴接地措施时,则应在轴的两端用电刷接地。

(10) 较大的零部件、有止口配合的零部件应设有安装调整拆卸用的螺孔,例如轴承座、端盖、机座等。

(11) 对相对位置要求较精确的零部件之间应设有定位销,例如轴承座与机座间、上下机座间、上下刷杆座间等。

(12) 装配前进行半精加工,装配后还将进行精加工的零部件必须考虑装配后进行精加工时的定位基准,例如电枢转轴。

(13) 紧固件应有良好的防松措施,应尽可能使用止动垫圈,导电部分与转动部分尽量不用弹簧垫圈。

(14) 对需用吊具搬运、安装的零部件应考虑挂吊结构。

3 船舶推进电机的绝缘

船舶推进电机一般工作在环境温度高、湿度大,有油污及冲击震动的条件下,又要求其使用寿命长,这就对推进电机的绝缘提出了更高的要求。20世纪80年代以后,形成了较为完整的F级电机绝缘系统。

3.1 绝缘结构

(1) 定子主极。

1) 主极绕组:双玻璃包漆包铜扁线绕制,绕制时,在换位处垫6640复合材料一层,边绕边刷7122-1漆。

2) 主极:主极铁心先用复合材料6640包三层,绝缘在铁心非接线片的端部交叉搭接,主极绕组直接在铁心上绕制。

3) 主极整体真空压力浸7122-1漆一次,旋转烘焙,普通浸7122-1漆一次,旋转烘焙。

(2) 定子换向极。

1) 换向极绕组:用铜母线TMR绕组,再用桐马环氧粉云母带570半叠包两次,再用ET100玻璃丝带半叠包一次。

2) 换向极:换向极铁心上先用复合材料6640包三层,将换向极绕组装入铁心上,端部用3240环氧玻璃布板垫好。

3) 整体真空压力浸7122-1漆一次,普通浸7122-1漆一次。

(3) 定子连接母线。铜母线TMR用桐马环氧粉云母带

半包两次，再用 ET100 玻璃丝带半叠包一次。
(4) 定子装好主极、换向极后，并连好连接线后，淋 7122-1 一次。

3.2 电枢

3.2.1 换向器

- (1) 换向器片间云母为 541 环氧粉云母板。
- (2) 换向器 V 形环用：251 塑型云母板。
- (3) 换向器套筒绝缘：在套筒上半叠包一层 570 环氧粉云母带，再用 0.1×20ET100 玻璃丝带半叠包一次，再刷 7122-1 漆，并烘干。
- (4) 换向装配后，空腔内灌 7126 环氧灌注胶，云母环外露部分用无纬带绑扎两层，再粘贴经活化处理聚四氟乙烯一层。

3.2.2 电枢绕组

- (1) 导线用 TBR 铜扁线，外用聚酰亚胺薄膜半叠包一次，并排的另一根导线用聚酰亚胺薄膜半包两次。
- (2) 线圈包绝缘：线圈直线部分用 0.1 环氧单面薄膜补强粉云母箔 7125-1，次数为 $5\frac{3}{4}$ ，转角处半叠包 0.1 环氧单面薄膜补强粉云母带 7125-2，三次，再半叠包 ET60 玻璃丝带一次，端部半叠包 0.1 环氧单面薄膜补强粉云母带 7125-2，两次，再半叠包 ET60 玻璃丝带一次。

3.2.3 电枢装配

- (1) 槽绝缘：0.2mm 复合材料 6640。
- (2) 电枢线圈与铁心之间用 4330 塑料压制的扇形齿块隔开。
- (3) 嵌完线后电枢上绑扎 H200-W 高强度无纬带。
- (4) 电枢真空压力浸 7122-1 漆一次，普通浸 7122-1 漆一次，旋转烘焙。

3.2.4 电枢均压线

用铜扁线 TBR，外面半叠包 0.05 聚酰亚胺薄膜一次，再半叠包 0.1 环氧单面薄膜补强粉云母带 7125-2 一次，再半叠包 ET100 玻璃丝带一次。

3.3 主要绝缘材料和使用工艺

3.3.1 采用单面补强薄膜粉云母箔作为成型绕组对地主绝缘

与通常所用的双面玻璃布补强云母带相比，采用单面薄膜补强粉云母箔，材料厚度薄 (0.09~0.10mm)、耐压高 (>7kV/0.1mm)，在电机结构设计不变的情况下，可以提高容量 14% 以上，同时云母含量也可大幅提高，使电性能和长期老化性能等以进一步保证。单面薄膜补强粉云母箔是以含固化剂的 F 级环氧树脂作为胶粘剂，薄膜单面上胶后与云母纸复合烘焙而成，其基本生产流程为：

电工级聚酯薄膜—涂胶—复合云母纸—烘焙—收卷
该材料的使用工艺为热卷热压成型，将云母箔铺于 80~90℃ 的电热平板上，使胶从云母纸表面渗出，同时使材料具有一定的柔软性，卷包线棒后，在 150~160℃ 下热压 30min 成型。

- 7125-1 单面补强粉云母箔的性能指标如下：
- (1) 尺寸：材料成卷状供货，宽度为 450mm±50mm，厚度为 0.10mm±0.02mm。
 - (2) 外观：表面平整，胶粘剂分布均匀，无明显气泡和分层现象。
 - (3) 组成：云母≥50%，胶粘剂≥16%，挥发物≤3%。

- (4) 开卷性：在室温下容易开卷，不粘连。
- (5) 击穿电压：常态平均值不低于 7kV。
- (6) 可塑性：在温度 150℃±5℃ 下处理 35min 可塑制成管。
- (7) 抗张力：不小于 30N。

3.3.2 采用无溶剂漆和 VPI 旋转烘焙工艺

随着绝缘漆制造技术的发展，从 20 世纪 90 年代初以来，使用无溶剂绝缘漆已越来越普及，由于船用电机需要有良好的防潮性能，因此，必须选用无溶剂漆。而为了获得较高的树脂填充率，防止树脂流失，从而有得于降低温升，提高冷热绝缘电阻，尤其是受潮后的绝缘电阻，应尽量采用 VPI (真空压力浸漆) 和旋转烘焙的工艺。以下为处理某型电机的浸漆工艺。

- (1) 工件预烘 120~130℃，4~5h。
 - (2) 工件入罐温度 45~50℃。
 - (3) 抽真空：罐内残余压力不大于 300Pa，保持 20min。
 - (4) 输漆：真空输漆到高出工件 200mm 止。
 - (5) 加压：关闭输漆阀门，氮气加压 0.4~0.6MPa，保持 20min。
 - (6) 解压至 0.1MPa。
 - (7) 回漆。
 - (8) 滴漆：5min (尽可能短，快速上旋转烘夹具)。
 - (9) 旋转烘焙温度和时间：150~160℃，10~12h。
 - (10) 第二次普通浸漆：同 (2)、(4)、(7)、(8) [电机如果存放一段时间后浸第二次漆前，必须重复工序 (1)]。
 - (11) 旋转烘焙温度和时间：150~160℃，12~14h。
- 7122-1 的绝缘漆的技术条件如表 5.3-1 所示。

表 5.3-1 7122-1 技术条件

序号	指标名称	单位	指 标
1	外观	—	淡黄至红棕色液体，透明无机械杂质
2	黏度 (4# 杯, 20℃±1℃)	s	30~80
3	酸值	mgKOH/g	≤25
4	胶化时间 (试管法, 140℃±2℃)	min	≤15
5	表干时间 (140℃±2℃)	h	≤2.5
6	固化挥发份 (50×50×25mm ³ 铝皿, 10 克树脂, 140℃±2℃, 3h)	%	≤18
7	吸水率	%	≤1
8	击穿强度 (漆饼法)	常态	≥25
		155℃±2℃	≥19
		浸水 24h	≥23
9	体积电阻率	常态 20℃±2℃	≥10 ¹⁵
		155℃±2℃	≥10 ¹⁰
		浸水 24h	≥10 ¹⁴
10	耐霉菌生长性	级	优于 II 级

在相同的温升和使用条件下，对低压电机绝缘而言，一般耐热性是最主要的。近十年来，材料工业发展极快，采用 H 级绝缘材料工艺日趋成熟，制造成本与 F 级相比增加得也不是很多，因此对于某些服役时间较长的特种船用电机来讲，采用耐热性好的 H 级绝缘材料和结构尤为重要，可大

幅度提高电机的长期使用寿命。

3.4 发展方向

随着变频和调速技术的发展,由于交流电机具有功率大、成本低、电机体积小、制造和维护方便等优点,船用电机将逐步由直流电机向交流电机发展,国外船舶主推进器采用交流变频电力推进已越来越多。实践证明,过去几十年研究发展起来的工频正弦波电压下的电机绝缘设计理论已不能适用于交流变频电机,变频电机绝缘损坏的机理主要表现在电磁线的损坏,主绝缘、相绝缘和绝缘漆的损坏,循环交变应力造成的绝缘加速老化等。

根据变频电机绝缘损坏的机理,应采取下面的措施加强变频电机绝缘结构。

3.4.1 选用合适的电磁线

变频电机中的电磁线处于大量谐波与变频的脉冲电压作用之下,电磁线的绝缘性能对变频电机绝缘结构的影响尤为重要。对于功率在 300kW 以下的变频电机,一般选用圆漆包线,国内目前可供选择的漆包线主要是 QZY-2 和 Q(ZY/XY)-2,国外变频电机用的漆包线均已采用专用的特殊漆包线。对 300kW 以上的变频电机,其电磁线主要选用 FCR 耐电晕聚酰亚胺薄膜烧接线,国外最近开发成功的薄型单面聚酯薄膜补强云母带绕包线,比 FCR 线具有更可靠的防电晕性能和使用寿命。

3.4.2 获得无气隙绝缘

变频电机绝缘结构中若存在气隙,在变频电机脉冲电压的作用下,气隙会产生空间电荷,导致局部放电的数量增加,最终导致绝缘损坏,目前常用的无溶剂型浸渍漆,由于苯乙烯单体在高温固化中易挥发,难以形成无气隙绝缘。采用低挥发份的快干无溶剂漆和 VPI 旋转烘焙工艺,绝缘漆在固化过程中的挥发物小于 5%,基本上可以形成无气隙绝缘。

3.4.3 提高绝缘结构的整体性

对于大型交流电机,国外一般采用绕组整体 VPI 成型工艺,也就是线棒或线圈包绕少胶云母带后,不经成型处理就嵌入定子槽内,绑扎固定后,绕组连同定子铁心一起进行 VPI。少胶云母带和绝缘漆必须有好的相容性,使其具有较低的介质损耗。整体浸渍提高了电机绕组散热效果,减少了线圈嵌线损伤,提高了绝缘结构的整体性和机械强度。

4 船舶推进电机的发热和冷却

船舶推进电机的特点是大容量、低转速、高转矩、高比功率、多工况、功率和转速变化范围很宽。船舶的排水量越来越大,航速增高,所需推进动力越来越大,导致推进电机的容量也逐步增大。单机容量越大,电机的发热将越严重,成为限制船舶推进电机容量增长的主要障碍。由于损耗与电机的线性尺寸的 3 次方成正比,而散热面积只与电机的线性尺寸的 2 次方成正比,因为当冷却强度不变时,实际电机温升加上内部温升将很高。即使维持原有的电磁负荷,而电机容量增大后,它的热负荷和温升仍然会以更大的比例增长,电机温升可以达到不能容许的程度。

4.1 船舶推进电机的发热

4.1.1 电机的热源——损耗及其分布

船舶推进电机运行时所产生的主要损耗均转变成热能,使电机发热。在研究船舶推进电机发热与冷却问题时,首先应该了解电机中热源及其分布,冷却发热部分,适当地调节

通风系统的支路流过的面积及发热体的散热面,以求船舶推进电机的温升力求均匀,并限制在允许范围之内。

船舶推进电机的损耗可分为以下几大类:

(1) 铁损耗。常把它分为基本铁损耗和附加损耗。附加损耗包括定、转子表面损耗,定、转子磁场中的高次谐波在转、定子上产生的附加损耗,齿内的脉振损耗,绕组端接部分的漏磁通在附近各部件中产生的铁损耗。

(2) 铜损耗。这包括绕组导线中的铜损耗(常称为基本铜损耗)和槽内横向漏磁通使导线截面上电流分布不均匀所增加的附加铜损耗。

(3) 励磁损耗。维持船舶推进电机励磁所产生的损耗,主要是励磁绕组中的铜耗和励磁回路中组件损耗。

(4) 机械损耗。主要是轴承损耗和通风损耗(包括风摩损耗)及炭刷损耗。为维持海水—空气冷却器冷却介质循环的泵的动力消耗,实际上应视为船舶推进电机的机械损耗。但通常把它们计算到船舶损耗中去了。各部损耗在电机设计资料中均有较全面叙述,我们这里就不再重复。

4.1.2 船舶推进电机发热对电工材料的影响

4.1.2.1 推进电机发热与绝缘寿命

众所周知,电机发热是影响绝缘寿命的主要因素。绝缘寿命与电机持续运行温度呈指数规律变化,即

$$D = A_0 e^{\frac{-1000}{mT}} \quad (5.3-1)$$

式中: A_0 为当温度为 0℃ 时的绝缘寿命; T 为绝缘持续温度,℃; m 为常数。对于船舶推进电机而言,一般均采用 B 级以上绝缘。对于 B 级, $m \approx 10$, 对于 F、H 级, m 分别可取 12 和 14。

试验证明,绝缘在额定温度 T_N 下持续运行的寿命大致在 6~8 年(平均可取 7 年),因此,不同工作温度下绝缘寿命可用更明确的公式表达

$$D = 7 \times 2^{\frac{T_N - T}{m}} \quad (5.3-2)$$

可见,对于 B、F、H 级绝缘,温度每上升 10、12、14℃,寿命将缩短一半。

绝缘的耐热寿命通常都由试验来确定。

4.1.2.2 船舶推进电机发热与金属强度和硬度的关系

金属的强度和硬度随温度升高而下降。船舶推进电机局部区域和部件的温度可能达到很高的程度。这些高热点除了对线圈绝缘直接或间接地造成一些危害外,对材料机械强度产生的影响也是不可忽视的。

几种金属的硬度随温度变化的规律是:常用的电解铜,当温度超过 220℃,硬度迅速下降,到 280℃ 时,几乎只有原来的一半了。含银铜线,情况有些改善,但也不能超过 300℃。温度不太高但持续时间长也能造成金属软化。船舶推进电机中局部温度超过 160~170℃ 是可能发生的,这便要求我们有预见地考虑到热变形和热应力。

4.2 船舶推进电机的通风冷却

船舶推进电机一般都利用空气进行通风冷却,随着船舶推进电机功率的增加,防潮、防尘、降噪要求的提高,电机的散热面积和风路安排受到较多的限制,使通风冷却较为困难。所以需要不同的冷却方式和通风系统保证电机的温升和最热点温度不超过允许值。

要达到这一目的,通风系统必须满足如下条件:①总风量满足设计需要;②流经电机各部分的风量分配力求合理;③单位体积流量的通风损耗小;④结构简单,运行安全可

靠,维护及加工方便,这就要求合理地设计风路。

4.2.1 船舶推进电机通风冷却方式

4.2.1.1 按空气循环的能量来源分类

(1) 自通风冷却系统。在推进电机的转轴上装有风扇,依靠电机转子自身的旋转作用,将冷却空气吸入电机中或从电机中排出热空气。

这种冷却方式一般用于中小型船舶推进电机上,如辅侧推进电机、经航推进电机等。

(2) 强迫通风冷却系统。推进电机借助于外加单独电动通风机,迫使冷却空气吹入电机中经过电机各散热面,吸收电机的损耗热,冷却电机的发热部位。

船舶主推进电机功率很大,电机发热量大,都采用这种冷却系统。

4.2.1.2 按空气循环的封闭与开启分类

(1) 开启式通风冷却。电机周围的冷却空气,直接从电机进风口进入电机中,经过电机各散热面,吸收了电机的损耗热,冷却电机发热部位后,从电机出风口直接排出机外,不再重复循环。

因为通风冷却系统相对较为简单,一般用于辅侧推进电机、经航推进电机等中小型船舶推进电机上,过去船舶主推进电机也采用这种方式,因其固有的缺点,现在一般都不采用。

(2) 闭路循环通风冷却。冷空气进入电机中经电机各散热表面,吸收了电机的损耗热,冷却电机,自身温度提高,热空气经过空气冷却器、空气过滤器,冷却、过滤后,重新进入电机,空气在电机内部封闭循环。

这种方式具有进风温度稳定,不受环境温度影响,防潮、防尘、压头损失小和一定的噪声隔离能力等优点,现在船舶主推进电机一般采用这种通风冷却系统。

4.2.1.3 按空气进入电机后的主要路径分类

(1) 径向式——冷却空气由转子支架、转子铁心径向风沟穿过气隙,再进入定子径向通风沟和冷却器,然后重复如上的循环。这种方式,如果定、转子风沟配置适当,而且均匀,可使风量沿定子轴向均匀分布。

(2) 轴向式——冷却空气由电机的一端进入,沿电机的轴向风道如定转子气隙、磁极及定、转子铁心中特置的轴向风道,流入另一端,经热交换器冷却后,重新进入机内,继续循环。这种方式,因为空气沿途吸热,温度逐步升高,因此造成电机沿轴向的温升不均匀,出风端高于进风端。铁心较长的电机不宜采用这种系统。

(3) 径、轴向式——上述两种方式兼有的通风系统。目前大部分船舶推进电机都采用这种系统。

4.2.2 船舶推进电机通风冷却系统组成

推进电机空气冷却系统一般由电动通风机、冷却风扇、空气冷却器、空气过滤器等组成。

4.2.2.1 电动通风机

由电动机驱动的通风机应能在规定的环境温度下满足推进电机的通风要求。电动通风机的空气噪声和结构振动要求应与推进电机的要求相适应,需要低噪声级别的地方可考虑采用变速电动通风机。

电动通风机可安装在推进电机上,也可通过弹性座架安装到船体上。

4.2.2.2 冷却风扇

冷却风扇产生的风量和风压应满足电机的要求。装在转子上的风扇应可靠紧固,其结构强度应能避免由于振动或扭矩脉动而产生松动或损坏。如果风扇装在电机换向器端,应安装一块警告牌以警告人员不要在维护换向器时损伤风扇。

4.2.2.3 空气冷却器

空气冷却器应满足推进电机冷却的需要,其带走的热量应与推进电机产生的损耗相当。

空气冷却器以海水为冷却介质,其通水部分应经受密封性试验和强度试验而不损坏,不渗漏密封性试验压力:1.25倍设计工作压力,持续1h。强度试验压力:1.5倍设计工作压力,持续15min。

冷却器还应设有防电腐蚀的措施。

4.2.2.4 空气过滤器

主电机、应急电机应带有空气过滤器,其他电机必要时也应带有空气过滤器,过滤器的结构及安装应可靠牢固,应能承受冲击和振动。

电枢转动时,换向器与电刷间发生滑动摩擦,产生导电的电刷粉尘和金属粉末,这些导电粉尘若被冷却空气带到电机绕组表面沉积下来,则容易造成爬电击穿事故。

在封闭循环通风系统中,电机风道里有一段处于正压,另一段处于负压。在正压区的端罩门等处发生向外漏风,在负压区的风道里则产生吸风,因而脏污气不断被吸入电机。着灰尘在绕组表面沉积过多,会影响电机散热,容易造成电机过热和爬电击穿事故。

为了清除电刷与换向器磨损下来的导电粉尘,另外在换向器出风口处安装有空气过滤器。通过过滤器的滤尘,将导电粉尘及时滤出,保持整个通风系统循环空气达到净化标准要求。

为了解决补气孔吸入脏空气问题,在风道负压最大处(常在风机吸风口附近),装有小型空气过滤器。由此孔吸入的补充空气,事先经过滤尘,减少了空气的含尘量,从而达到净化要求。

空气过滤器的基本性能有三项,即空气流量、空气阻力损失(包括初阻力和终阻力)、过滤效率。

4.2.2.5 电加热器

另一个重要的措施是安装电加热器,防止水汽的凝结。

4.2.3 船舶推进电机几种典型的通风冷却系统

4.2.3.1 直流双枢推进电机的闭式循环通风冷却系统

通风冷却系统一般布置在船舶推进电机的下部。

船舶推进电机的通风冷却系统由四台电动通风机组、四台空气冷却器、两台空气过滤器及框架组成,采用闭式循环通风方式。整个通风冷却系统以双电枢的中心线为轴对称布置,如图5.3-1所示。

通风机将冷却空气从推进电机非换向器端端盖下部的进风口强行吹入电机内,然后分成三条并联风路运行:

- (1) 定子冷却风路。
- (2) 电枢铁心和电枢绕组冷却风路。
- (3) 换向器冷却风路。

其中第(3)条含碳粉的热空气,经过两台空气过滤器过滤后,分成两路分别与冷却前后端的电枢、定子的热空气会合,再分别经过两组空气冷却器冷却,最后进入四台风机,进行下一轮循环。这种形式的风路在船舶推进电机中已有应用,证明风路设计合理、冷却效果好,工作可靠。

根据船舶舱室布置通风冷却系统也可以布置在船舶推进电机的上部如图5.3-2所示。其组成及风路和下部一致。

4.2.3.2 船舶交流推进电机通风冷却系统

布置在船舶推进电机的上部的通风冷却系统如图5.3-3所示。

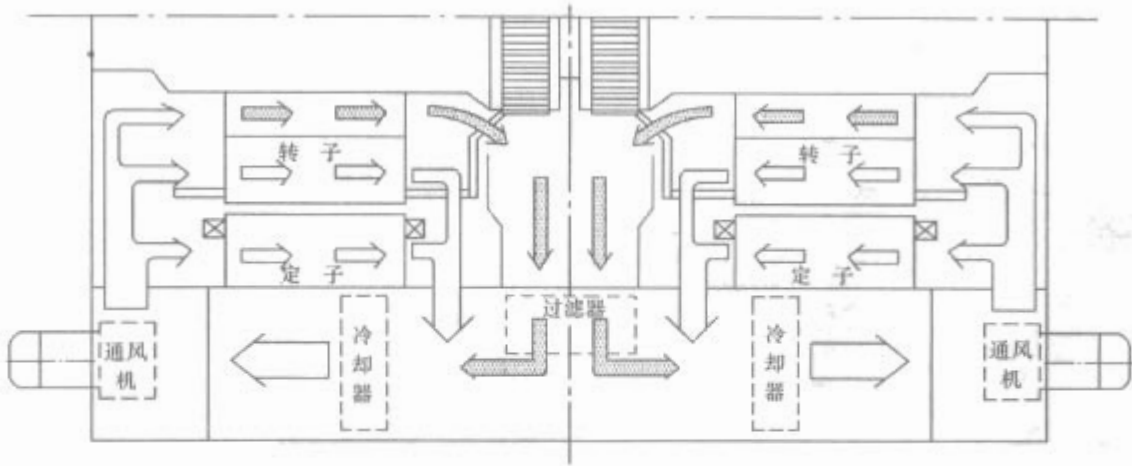


图 5.3-1 船舶推进电机闭式循环通风冷却系统示意图

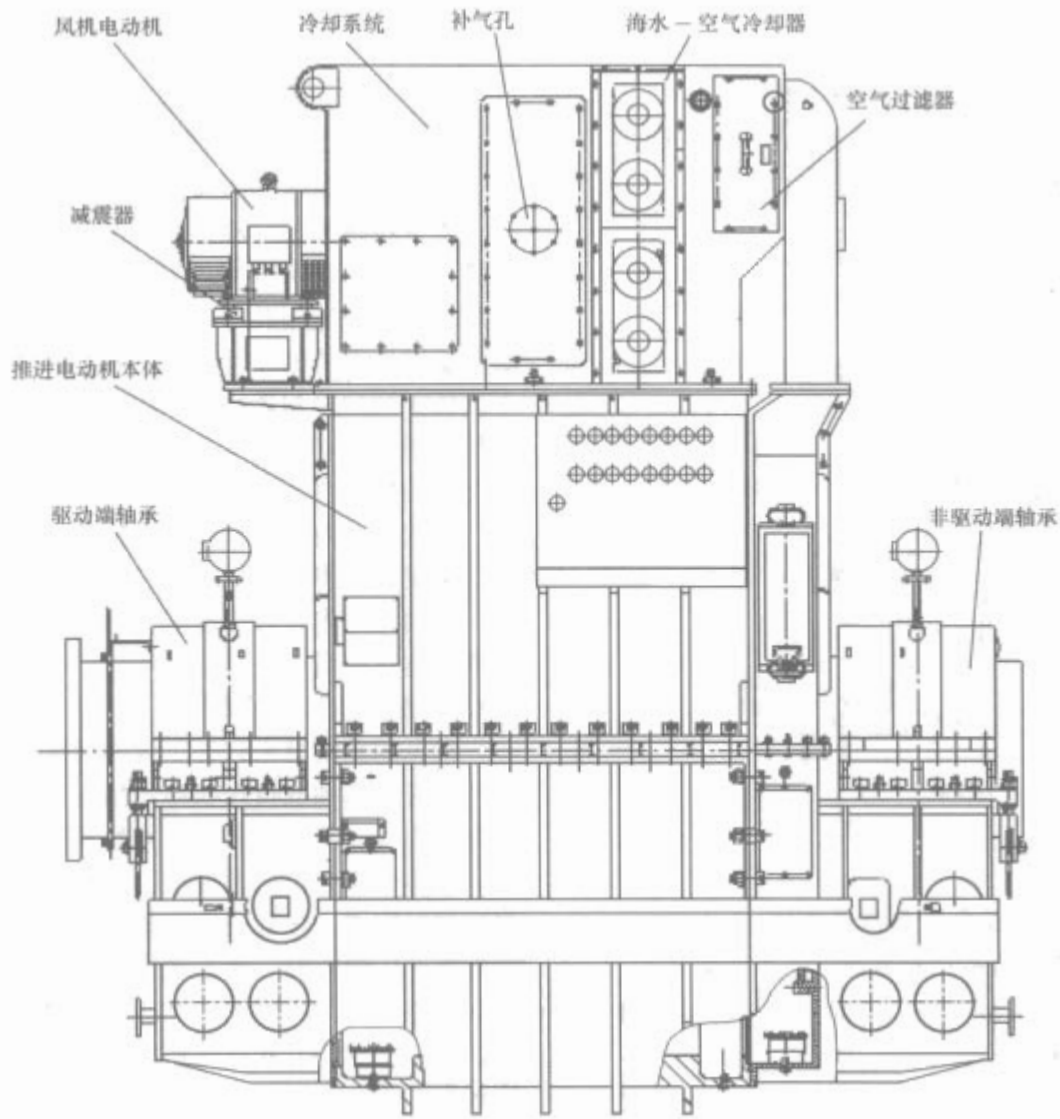


图 5.3-2 安装在船舶推进电机上部的通风冷却系统

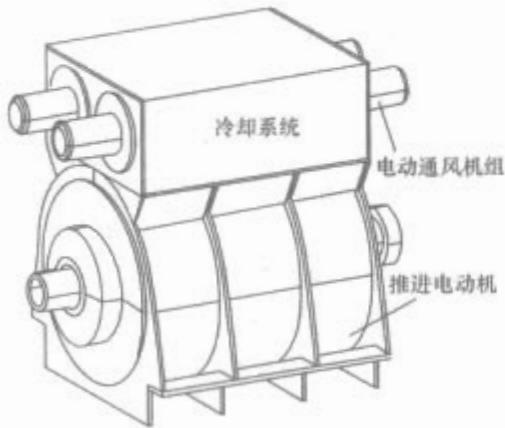


图 5.3-3 船舶交流推进电机通风冷却系统

4.2.3.3 斜挂角船舶交流推进电机通风冷却系统

四台风机斜挂角船舶交流推进电机通风冷却系统是在图 5.3-4 通风冷却系统在船舶交流推进电机上发展起来的。其优点是冷却装置基本不增加电机的高度和宽度。另一显著特点是进出风路路径比较短，风阻小，可以更有效的带走热量。图5.3-5是其风路示意图。

4.3 船舶推进电机的其他冷却方式

4.3.1 水冷却

以水为冷却介质的冷却系统冷却效果比空气冷却系统好，而且没有空气噪声，越来越受到船舶推进电机的青睐。该系统电机定子水冷却较好实现，转子因为存在旋转的动态和静态之间的密封问题，结构较为复杂。

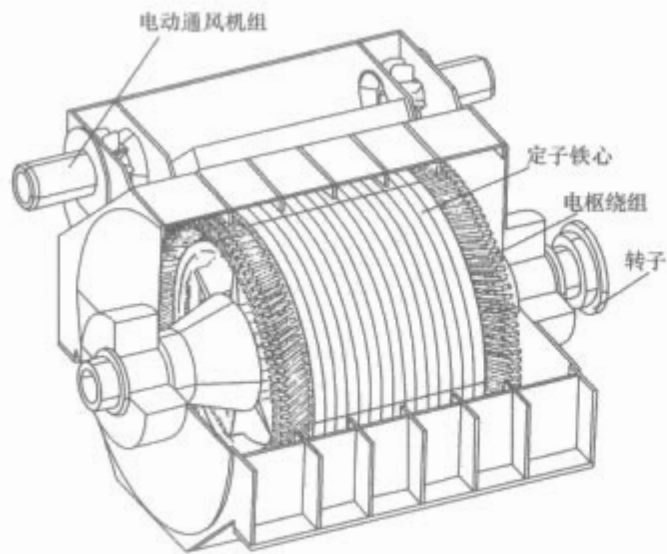


图 5.3-4 船舶交流推进电机通风冷却系统

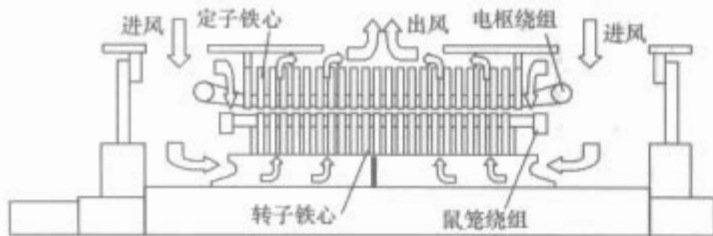


图 5.3-5 斜挂角船舶交流推进电机通风冷却系统风路示意图

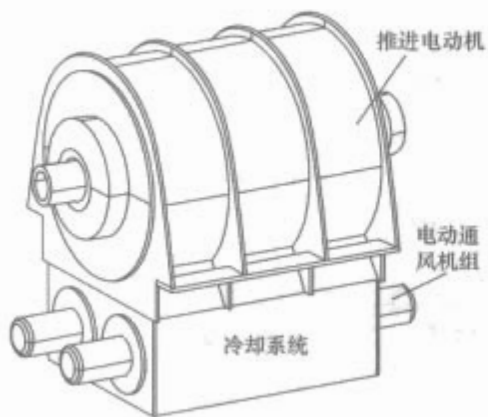


图 5.3-6 布置在船舶推进电机下部的通风冷却系统

(1) 水外冷。在推进电机内部，冷却水不直接流过载导体，而是间接冷却电机。

该系统对水质要求不高，不影响电机绝缘电阻，已经在许多船舶推进电机上应用，特别是永磁推进电机上。冷却形式一般有如下几种：

1) 船舶推进电机定子机座制成双层，两层间通水。电机绕组产生的热量，通过铁心、机座传给水带走。

2) 船舶推进电机定子铁心额部通以水管。电机绕组产生的热量，通过铁心传给水带走。

3) 船舶推进电机定子铁心槽内通以水管。电机绕组产生的热量，直接传给水带走。

(2) 水内冷。冷却水流过推进电机的空心载导体，直接冷却电机。

该系统对水质要求很高，水质稍差电机绝缘电阻则明显下降，另外电机制造工艺要求很高，比较复杂，目前在船舶推进电机中应用较少。

4.3.2 蒸发冷却

蒸发冷却是船舶推进电机冷却领域内继空冷、水冷技术之后的又一重要发展，是一种新型、高效的冷却技术，以其

卓越的性能而受到国内外的重视。

船舶推进电机以往的冷却方式，无论是空冷还是水冷，从吸热的原理说，都是利用冷却介质的比热容，即冷却介质本身温度升高吸收热量，从而冷却电机的。

冷却介质单位时间吸热量

$$Q = Gc\Delta t$$

式中： G 为流体的质量流量； c 为流体的比热容 [空气约为 $1.005\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，水约 $4.187\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]； Δt 为流体的温升。

因而它们的共同之处是：温度差别较大，冷却介质的流量较大，都需要消耗一定的动力来推动流体介质循环。

蒸发冷却则是利用液体汽化吸热的原理来冷却电机的，也就是冷却介质沸腾时的气化潜热带走热量

$$Q = Gr$$

式中： r 为汽化潜热，1个标准大气压时水为 $2257\text{kJ}/\text{kg}$ ，氟利昂-11 为 $180.1\text{kJ}/\text{kg}$ 。

由于冷却介质气化潜热比其比热大得多，所以冷却效果更为显著。因此蒸发冷却从原理上说是一种高效的冷却方式，具有吸热量大、所需流量小、温差小等特点。

因为所选择的冷却介质不同、蒸发温度高低不同、循环方法不同，以及结构型式的差别，可以有很多种型式的蒸发冷却。我们可选用其中的一种或结合两种以上型式，使之满足船舶推进电机的冷却需要。若一次冷却介质蒸发的温度高于或低于两次冷却介质（水或空气）的称为常温或低温蒸发冷却。外加了动力推动介质循环的称为强迫循环；不使用外界动力的称为自循环。由于结构型式不同又可分为管道内冷、开放管道内冷以及浸润式冷却，此外还有像喷雾式、热管式蒸发冷却等。

目前，国内开展了浸润式蒸发冷却、喷雾式蒸发冷却船舶推进电机的研究工作。

4.3.3 热管式蒸发冷却

常见的热管是由管壳、管芯组成。

热管内部抽成负压状态，然后充入适当的液体介质，液体介质为气、液两相共存，并处于饱和状态。由于负压的存在，液体介质在很低温度就会沸腾。管壁有吸液芯，由毛细多孔材料构成。热管一端为蒸发端，另一端为冷凝端，当热管两端产生温差时，蒸发端中的液体迅速蒸发，蒸汽在微小的压力差下流向冷凝端，在冷凝端凝结液化后，通过毛细作用，流回蒸发端，如此循环往复，完成换热功能。热量由热管蒸发端传至冷凝端，这种循环是快速进行的，在极端的情况下，其速度可达到甚至超过音速。因此热量可以被源源不断地传导开来，并且不会在发热部位堆积，而是均匀地散发到各个部位，从而极大提高导热性能。

5 船舶推进电机减振降噪

采用电力推进的军事用途的舰船或有特殊用途的商船中，例如潜艇、水声测量船或渔业船，大功率推进电机的振动、噪声特征信号受到很大的关注，减振降噪技术被认为是推进电机的关键技术之一。

船舶推进电机可直接驱动螺旋桨或通过减速齿轮减速后驱动螺旋桨，通过弹性联轴器与推进轴系同轴安装，支撑底脚通过减振器直接安装到船体机座上，推进电机作为旋转机械产生的振动能量会通过船体向外传播、发射，成为传入水中的主要噪声源之一，其发生和传播途径如图 5.3-7 所示。

推进电机结构复杂，其振动噪声不仅与设计方案、供电电源品质有关，还与制造、安装工艺过程密切相关，在工程

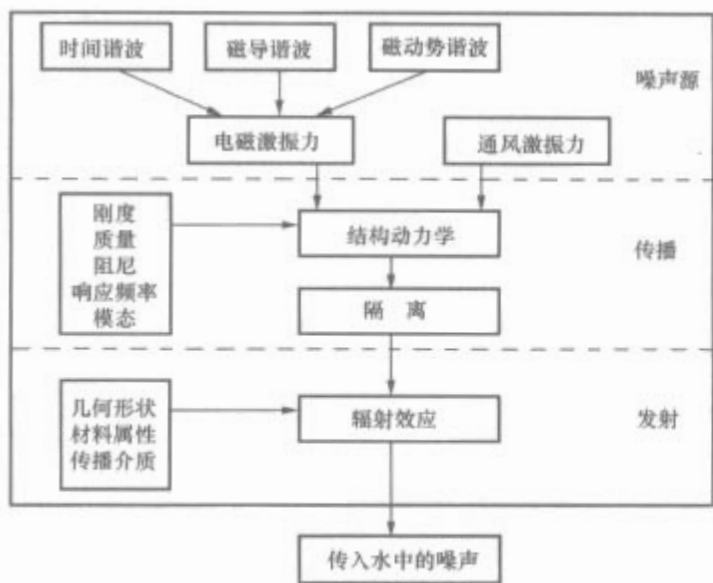


图 5.3-7 推进电机噪声源和噪声传播

上对振动噪声进行准确预测分析还存在许多困难。

5.1 振动

5.1.1 振动源

不管推进电机采用直流电机还是交流电机，推进电机的振动源主要包含两方面：电磁振动和机械振动。

电磁振动是由于电机气隙中电枢与磁场的相互作用而产生随时间和空间变化的径向电磁力波，该力波在气隙中是旋转的或是脉动的，力的大小与电磁负荷、谐波、电机有效部分的结构有关，它使定子产生振动，振动大小与作为振荡系统的定子特性有很大关系。

推进电机由于质量大，其一阶固有频率一般较低；另一方面，低速推进电机的速度范围较宽，电磁力的工作频率随着转速的变化而变化，与中小型电动机相比，推进电机具有复杂的动态谐振范围，某些工况的电磁力频率与推进电机的某低阶固有频率接近的可能性很大。当电磁力波的频率与电机定子的固有频率接近或相同时，就会引起很大的振动。

推进电机的机械振动主要是由于转子的机械不平衡产生的振动，它与转子的结构、材料、制造工艺等因素有关。推进电机的转速不高，但旋转质量大，存在的不平衡力矩不可忽视，在设计和制造中也应采取可能的措施进行控制。

5.1.2 测量方法和限值

推进电机的振动测量方法和考核指标可参照 GB 10068—2000《轴中心高为 56mm 及以上电机的机械振动——振动的测量、评定及限值》，考核工况为电机在空载、刚性安装条件下，频率范围从 10~1000Hz 内，底脚处的振动速度或振动烈度。

推进电机属于对振动噪声有较高要求的电机，振动测点相对陆用交、直流电机多，除需要测量两轴承处外，还需要在安装底脚处布置测点，各测点 X、Y、Z 三方向的振动速度有效值作为电机振动烈度评定大小的依据。

在 GB 10068—2000 标准中，规定了不同轴中心高 H (mm) 的振动烈度限值，见表 5.3-2 所示。其中 R 级电机多用于机床驱动中，S 级电机仅适用于轴中心高 $H \leq 400$ 的电机中。对于振动要求比表中数值更小的电机，推荐从 0.45、0.71、1.12、1.8mm/s 和 2.8mm/s 中选取限值。

对于转速小于 600r/min 的电机，标准中没有明确规定，由用户和承制方参照相关标准协商确定。

表 5.3-2 电机不同轴中心高 H (mm) 的振动

烈度限值 (有效值)						mm/s
振动等级	额定转速 (r/min)	电机在自由悬置状态下测量				刚性安装
		56<H ≤132	132<H ≤225	225<H ≤400	>400	>400
N	600~3600	1.8	2.8	3.5	3.5	2.8
R	600~1800	0.71	1.12	1.8	2.8	1.8
S	600~1800	0.45	0.71	1.12	—	—

注 N—普通级；R—一级；S—优等级。

此外，在一些特殊应用场合，对船用机电设备也可根据用户要求按振动加速度进行测试，通常在推进电机台架试验中，弹性安装条件下、负载工况运行，测量推进电机底脚处的振动加速度。

5.2 噪声

5.2.1 噪声源

电机的噪声源主要有电磁噪声、空气噪声和机械噪声三种，低速推进电机自身空气噪声和机械噪声较小，采用强迫风冷的推进电机，推进电机辅助设备电动通风机组的噪声成为主要的噪声源。对于采用水冷或其他特殊冷却的推进电机，不需外加通风机，空气噪声的大小取决于电机内部风路的设计，电磁噪声则成为主要的噪声源。

5.2.1.1 空气噪声

推进电机采用外加的电动通风机组对其强迫冷却时，要求通风机具有较大的风量、较高的压头。其旋转的叶片周期性打击空气质点，引起空气的压力脉动噪声较大，产生旋转噪声；气体在旋转的叶片后面产生涡流，引起气体扰动，形成气体的压缩和稀疏周期变化，产生涡流噪声。由叶片产生的旋转噪声和涡流噪声统称为空气噪声。

5.2.1.2 电磁噪声

推进电机的电磁噪声是由电磁力作用产生振动，由电机传播到其周围空间，引起空气中质点的振动而产生声波。

5.2.2 测量方法和限值

5.2.2.1 测量方法

推进电机及通风冷却系统的噪声的测量方法可参照国家标准 GB 10069.1—1988《旋转电机噪声测定方法及限值——噪声工程测定方法》。标准规定了电机噪声的测试项目为 A 计权平均声压级 \bar{L}_{PA} 或 L_{WA} 计权声功率级。由于推进电机体积较大，只能在一般环境（如大的车间、试验站等）或现场测试（如舱室），按标准进行反射和背景噪声修正。

推进电机（轴中心高一般都大于 225mm）噪声测量按矩形包络面法，一个假想的六面体“包络电机”与电机相距一个测量距离，一般测量点距离电机外表面为 1m，传声器的测量位置分布在该面上，一般布置最少 5 个测量点。有关具体测点布置可参照 GB 10069.1—1988。

5.2.2.2 噪声限值

推进电机空载稳态运行时 A 计权声功率的噪声限值可参考 GB 10069.3—1988《旋转电机噪声测定方法及限值——噪声限值》中的有关规定。当有特殊要求时，由用户和承制方参照相关标准协商确定。

5.3 振动源与噪声源的抑制

推进电机的减振降噪措施涉及电磁设计、结构设计和冷却等诸多环节，其中的某些措施与推进电机减小外形尺寸和质量的设计要求是相互制约和相互影响的。如直流推进电机

斜槽可能引起电机换向裕度的减小,要兼顾电机在长期工作可靠换向的要求;提高机座和轴承的刚度可能要求增加部件的外形尺寸,因而增加电机的外形尺寸和质量;降低通风机风量风压的要求,可能要求采用更高耐热等级的绝缘材料,并使效率有所降低等。因此,设计者要兼顾总体要求和各种性能的前提下,考虑综合减振降噪的措施。

5.3.1 电磁振动与噪声抑制

5.3.1.1 模态分析与振动计算

对推进电机进行模态分析,计算各阶固有频率和相应的模态,使固有振动频率不与电机的各主要激振力的频率及相关的谐波频率靠近或重合,如果发现电机定转子的结构动力特性不满足预期的设计要求,则需要对电磁参数的合理设计,或对定转子的结构进行必要的修改。

必要时,还可以进行电机振动特性计算,计算电机最大响应所对的频率及测点的振动分布曲线,可通过分析指导电机的结构设计和电磁设计。

5.3.1.2 选择适当的气隙磁通密度

由于电磁力幅值与气隙磁密(B_g)的平方成正比,推进电机的设计中 B_g 取值要适中;定转子气隙 δ 的增大,可降低气隙谐波磁通密度,任意两个谐波磁场相互作用的径向力约与气隙的二次方成反比。所以,在励磁功率一定的前提下,正确选取主气隙值 δ 。

5.3.1.3 采用偏心气隙

采用偏心气隙可以削弱电枢反应,以及削弱引起振动和噪声的电磁交变力的作用,改善气隙磁场波形。由均匀气隙和偏心气隙总磁导等效的条件得出,当气隙偏心率为1:2或1:3时,比采用均匀气隙时的电磁激振力几乎可减小一半。

5.3.1.4 合理选择直流电机的电枢槽数和补偿槽槽数

电机机座的振动模态形式与极弧下的电枢槽数 $\alpha(\alpha = b_p/t_1)$ 、每极下的电枢槽数 $(Z/2p)$ 有关,选择电枢槽数 Z 时,一般偏重使 $Z/2p$ 值大且不等于整数,可使磁通的齿槽脉动减小,因而使电机的电流脉动和磁振动减小。对于有补偿绕组的电机,还应注意补偿槽数的选取,补偿槽距(t_{pl})和电枢槽距(t_1)不能太接近,一般应错开10%~15%。

5.3.1.5 合理选择异步电动机定、转子槽配合

异步电动机的定、转子齿谐波磁场由定、转子槽数决定,槽配合直接影响由定转子谐波磁场相互作用所产生的径向力的大小、阶次和频率,对电磁噪声的大小和频率影响很大。当采用新的槽配合时,除了要遵守槽配合选择的基本原则外,还应进行电磁场计算,分析齿谐波的影响,进行槽配合的比较择优。

5.3.1.6 采用斜槽或斜极

由于推进电机有较宽的调速范围,电磁激振力的频率变化范围也较宽,为避免共振,一般采用斜槽或斜极。斜槽或斜极可使磁极上的电磁力在电枢转过一个槽距的时间内,力的矢量相位从电枢一端边缘到另一端边缘将按线性变化,力的合成矢量值较小,可明显降低电磁激振力。

5.3.1.7 变频器与推进电机的匹配性设计

变频器输出采用滤波器可以改善推进电机的输入波形,减小电流谐波;在推进电机的中低速区,变频器磁通控制策略的优化,可进一步减小电磁噪声源的噪声,变频器的开关频率和载波频率与电磁噪声也有一定的关系。

5.3.2 机械振动抑制

5.3.2.1 提高推进电机转子的动平衡精度

推进电机的电枢质量大、转速低,难以用专用动平衡机

对推进电机的电枢进行动平衡校正,一般采用现场校动平衡的方法。目前,现场动平衡的精度由于高精度数据采集系统、传感器、测验软件的发展,使推进电机的电枢现场动平衡的精度得到了进一步的提高,可以满足工程应用的需要。

由于理论校正量需施加的位置受电机电枢结构的限制,动平衡的实际效果也会受到一定的影响,因此,在结构设计时要充分考虑平衡块的加装位置,使平衡校正量的施加方便可行。

电枢动平衡的残余不平衡量一般可参照GB 9239—1988《刚性转子平衡品质 许用不平衡的确定》的有关规定进行。

5.3.2.2 提高电动通风机组的转子动平衡精度

提高叶轮加工精度及动平衡精度,进行风机电动机转子与通风机叶轮的整体动平衡,将旋转体的整体残余不平衡量转矩控制在标准以内,若条件许可,尽可能提高动平衡精度。

5.3.2.3 提高定子关键部位的刚度

推进电机的振动是通过机座的底脚和轴承座传递到安装基础和船体,提高机座、端盖和轴承的刚度,增大阻尼,可减小振动的幅值。

5.3.3 空气噪声抑制

5.3.3.1 降低通风机噪声

通风机噪声大小与通风机叶轮直径、叶片结构型式、转速、蜗壳外形尺寸等有关,其降低噪声的主要措施如下:

(1) 开展通风机空气动力性能计算,进行通风机叶片的优化设计。

(2) 在保证通风机空气动力性能的条件下,适当减少叶片数,通过降低叶轮的旋转频率达到降低通风机噪声。

(3) 在总体外形尺寸许可的范围内,尽可能降低通风机的转速。

(4) 提高通风机叶轮的加工精度,减小叶轮加工时出现的不平衡力。

(5) 提高叶轮的动平衡精度,减小叶轮转动时产生的不平衡力。

5.3.3.2 采用闭式通风冷却系统

采用闭式循环通风冷却系统,冷却风不排入舱室中,而是回到电机的进风口循环使用,整个通风冷却系统为箱体结构,利用外壳厚板可明显降低噪声。

5.3.3.3 优化风路,减小通风机的风量需求

在推进电机和通风冷却系统设计中,合理选取风路参数,在风路转弯处设置弧形导风板,使电机内部风阻减小,以减小通风机所需全压和风量。

5.3.3.4 设置消声器

采用闭式通风冷却系统虽然具有一定的隔声作用,但在吸入和排除冷空气的孔洞附近,是空气动力噪声辐射较大的地方,在这些地方添置消声器是抑制噪声最简单和最有效的方法。

5.3.3.5 采取其他冷却方式

对永磁推进电机可采取水冷,没有外加强迫风机,大大降低空气噪声。

6 船用推进电机可靠性、维修性和安全性设计准则

6.1 可靠性设计准则

6.1.1 新技术采用准则

设计推进电机时应优先采用成熟的技术,追求运行可靠

和技术先进两者统一。在设计中,对新结构设计、新材料的选用必须有良好的研究基础,或进行严格的试验和鉴定,确保风险最小。

6.1.2 简化设计准则

(1) 在保证达到推进电机性能指标和运行安全可靠的前提下,应尽量使电路、结构和工艺简单。

(2) 应尽量减少零部件、元器件、标准紧固件、外购件的品种、规格和数量。

6.1.3 热设计准则

(1) 冷却系统设计应保证电机各部分的温升在许可范围内。

(2) 风路系统设计应使风路的风阻小、风量分配合理。

(3) 发热量较大的电力电子元器件应考虑散热条件。

(4) 使传热通路尽可能的短,传热截面尽可能大。

(5) 尽量降低电气连接接触面的电阻。

6.1.4 降额设计准则

(1) 电机的连接导线和电缆的工作电流、电压和温度应留有一定的裕度。

(2) 电机轴承的工作负荷、温升应考虑一定的裕度。

(3) 电机绝缘材料应考虑降级使用,如F级绝缘材料,B级温升使用。

6.1.5 装配设计准则

(1) 较大的零部件、有止口配合的零部件,应设有安装调整和拆卸用的螺孔。

(2) 相对位置要求较精确的零部件之间应设有定位销。

(3) 装配前进行半精加工,装配后还将进行精加工的零部件,必须考虑装配后进行精加工时的定位基准。

(4) 需用吊具搬运、装配的零部件,应考虑挂吊结构。

(5) 紧固件应有良好的防松措施。

6.1.6 耐受环境条件设计准则

(1) 电机结构强度和刚度应能承受外力冲击的作用。

(2) 绝缘材料和非金属材料应耐潮湿、耐盐雾、耐霉菌,还应具有不燃性或难燃性。

(3) 金属材料表面应进行防护处理,较小的零部件可用镀层保护,大件可涂防锈底漆和表面防护漆。

(4) 电机内部应设置电加热器,其容量应能使电机内部的空气温度保持高于外部环境温度约3~6K,其加热温度应不致使其附近的绝缘超过该绝缘的允许温度。

(5) 在船舶允许的各种倾斜与摇摆情况下,供轴承润滑用的润滑油不得外漏。

(6) 通风冷却系统中应有空气过滤器,使电机内部的循环冷却空气洁净。

6.2 维修性设计准则

6.2.1 简化维修设计准则

产品的设计应在满足功能要求和使用要求的前提下,尽可能采用最简单的结构和外形。简化使用与维修人员的工作,降低对使用和维修人员的技能要求。

(1) 维修操作应简单、方便,当维修某一部分时,尽可能不拆卸或少拆卸其他部分,以减少维修工作量。

(2) 对易发生故障的零部件,应拆装方便、体积小、重量轻。

(3) 在维修中,机械调整要求应减为最少。

(4) 对维修用的窗孔,应采用拆卸方便的密封盖板或手柄式的可拆密封门结构。

(5) 经常拆卸的紧固件可考虑采用不脱出螺钉结构。

(6) 对易发生故障的单元,应设计成整体模块式结构,以便于局部更换或修理。

6.2.2 可达性设计准则

可达性是维修产品时接近维修部位的难易程度。用通俗的话讲,可达性可以用三句话表达:看得见(视觉可达);够得着(人手或借助于工具能接触到维修部位);有足够的操作空间。

(1) 对需要维护的零部件,例如换向器、电刷、轴承、电加热器、空气过滤器、冷却器等,应具有良好的可达性。

(2) 电机参数的检查点、测试点、滚动轴承润滑脂的注排点及维修用的窗孔等,均应布置在可达处。

6.2.3 可拆性设计准则

(1) 电刷装置中集电环、刷杆座应设计成可拆卸的结构。

(2) 滑动轴承设计时轴承座、轴瓦应为分瓣式结构。

(3) 为便于船上更换滑动轴承轴瓦,应设置相应的抬轴装置。

(4) 空气过滤器的滤料应便于更换。

(5) 特殊部件的拆卸应设计专用工具。

6.2.4 防差错措施及识别标志

防差错措施及识别标志的设置目的是避免使用和维修拆装时发生差错的可能性。

(1) 所有接线端子均应在明显处作出永久性标志,与其连接的电缆接头也应作相同标志。

(2) 在电机明显部位,布置接线原理图标牌,其上的标志应与接线端子及电缆接头标志一致。

(3) 应设计电机转向指示标牌。

(4) 应有接地标志。

(5) 设置刷杆座中性线位置标志。

(6) 采用分瓣电刷时,应有识别前、后电刷的标志。

(7) 设置滚动轴承润滑点标志。

(8) 在轴承附近设置润滑油或润滑脂的牌号及润滑方法与注意事项标牌。

6.2.5 提高标准化和互换性程度

提高标准化和互换性程度,主要是为了简化维修作业,节约备品备件费用,实现部件互换通用和快速更换修理。

(1) 优先选用通用的零部件、标准元器件和紧固件。

(2) 对故障率高、容易损坏的零部件或组件应具有良好的互换性和通用化。

6.2.6 设计时应依据人机工程原则

推进电机设计时,应考虑使维修人员的工作负荷和难度适当,以保证维修人员的持续工作能力、维修质量和效率。如提供适当的操作空间,使维修人员有比较合理的姿势,提供适度照明,尽可能避免超标准噪声或振动。若难以避免,需对维修人员采取保护措施。

6.3 安全性设计准则

安全性设计是避免维修人员伤亡或设备损坏的设计特性。

6.3.1 人员安全设计准则

(1) 电机的绝缘材料和其他非金属材料不得采用在正常使用条件下可能散发(或挥发)出有害物质的材料;尽量避免采用在火灾情况下可能散发出有毒气体或大量烟雾的材料。

(2) 在船员需要接近的零部件,应避免锐角、刃边、尖状凸起。

(3) 电机外壳温度超过 80℃时应加防护措施,以防止船员偶然触及而灼伤。

(4) 电机在正常工作期间,机座必须处于接地电位状态。

(5) 设置醒目的警示标记提醒船员应注意的安全事项。

6.3.2 设备安全设计准则

(1) 电机在通电之前,必须有足够的绝缘电阻值。

(2) 电机内不同极性或不同相的带电导体之间、带电导体与机壳之间,其电气间隙和爬电距离必须满足规定要求。

(3) 供电电缆穿过的金属板孔的周边应修圆并设绝缘保护。

(4) 各种电缆在机座外的布置应能避开硬件碰撞、避开踩踏。

(5) 旋转部件上紧固件的防松,应避免使用弹簧垫圈,一般采用止动垫片防松。

(6) 应采取措施防止轴电流损坏轴承。一般轴电压的峰值不应超过 1V,否则轴承应采取绝缘措施。

7 船舶直流推进电机

7.1 特性与要求

7.1.1 功率、电压和转速

7.1.1.1 功率

直流推进电机作为主推进动力时,功率很大,一般都在几千千瓦以上;作为巡航推进动力的直流推进电机,功率较小,约为几百千瓦,但转速比前者低,两类电机的转矩都比较大。

7.1.1.2 电压

直流推进电机可以由蓄电池组、直流发电机组或整流电源供电,电压范围一般约在 100~900V。设计时,电压等级的选取十分重要,特别是转矩较大的直流推进电机,较低的电压会增加设计的难度,使电机的外形尺寸和质量都会增加,对电机换向和效率等性能影响较大。

7.1.1.3 转速

直流推进电机转速与螺旋桨的转速相关,一般每分钟几十转到几百转,且调速范围较宽,最大调速比可达 1:10。

7.1.2 效率

直流推进电机一般要求具有较高的效率。当由蓄电池组供电时,它决定了蓄电池能量的消耗,从而决定了船的续航力。在计算效率时,需要将励磁损耗和外通风损耗考虑在内。

7.1.3 换向

直流推进电机的换向性能要求较高,其运行环境较陆用直流电机恶劣,要考虑长期运行使用中,盐雾、油雾、潮湿和霉菌等因素对电机换向性能的影响。因此尽可能采用改善换向的一切措施,设计时选择可靠的换向参数,确保有足够的换向裕度,一般要求在各种正常运行工况下的火花等级为 $1\frac{1}{4} \sim 1\frac{1}{2}$ 级。

7.1.4 温升

直流推进电机使用寿命为 25~30 年,其工作温度要考虑电机绝缘材料的使用寿命。为保证绝缘长期可靠工作,其温升考核等级一般比所使用的绝缘材料等级低,发热参数的选取必须适中。

在通风机故障时或要求不开通风机运行时,直流推进电机应能在要求的工况下正常工作,其各部分温升不超过标准

允许值。

当用蓄电池作电源时,推进电机的发热应以其平均电压来计算和考核。

7.1.5 励磁

直流推进电机的励磁方式一般是他励式。在励磁安匝一定的条件下,励磁电压的考虑要兼顾励磁调节器的方案,并要有一定的励磁储备。必要时,还可设置少量串极绕组,改善电机的机械特性,增加稳定性。

7.1.6 双枢微差特性

对双电枢直流推进电机,要求两个电枢应有较好的一致性,以利于功率的分配均衡和励磁调节的稳定运行。

同轴双电枢电机两端空载特性曲线,在其额定电压平均值 90%~110% 的范围内,在相同的励磁电流下,两条特性曲线的对应点的电动势差,应小于额定电压平均值的 1%。

7.2 结构特点

7.2.1 基本型式

推进电机的布置空间有限,调速范围较大,往往需要做成双电枢双换向器电机或单电枢双换向器电机。双电枢双换向器与单电枢电机相比,电枢之间可以串、并联;既可单电枢工作,又可双电枢工作,机动性好,可靠性高。但轴向尺寸较长,质量和体积较大,效率稍低。单电枢双换向器两个独立的换向器之间可以串、并联,增加调速区,灵活性较好,但结构相对复杂,风路上要特殊考虑。

直流推进电机基本型式有:

(1) 单电枢单换向器。同一轴上只有一个电枢和换向器,如一般电机的转子型式。

(2) 单电枢双换向器。同一轴上只有一个电枢铁心和两个换向器,在该铁心上放有两套独立的绕组,每一套绕组接到各自的换向器上,见图 5.3-8。

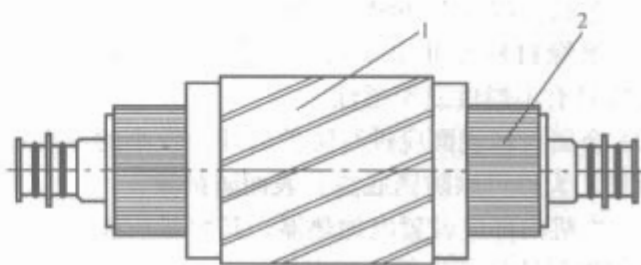


图 5.3-8 单电枢双换向器

1—电枢; 2—换向器

(3) 双电枢双换向器。同一轴上有两个独立的电枢铁心,每个铁心上有一套绕组,分别接到各自的换向器上,这两个电枢装在同一机壳内,有两个独立的磁路系统,两换向器可以置于两铁心中间,也可置于两端,见图 5.3-9。



图 5.3-9 双电枢双换向器

1—电枢; 2—换向器

(4) 双电枢四换向器。同一轴上有两个独立的带双换向器电枢。

7.2.2 机座

机座一般由钢板焊接而成,机座结构除考虑强度、刚度以及防护型式、冷却方式和安装等方面的要求外,同时应考

虑机座的结构工艺性要求。

推进电机的机座多为剖分式结构,其上、下机座的併合面位置应着重考虑安装和维护的方便,并装有定位销以保证定位。若推进电机布置在船的舷侧,则上、下机座为斜剖分。底脚也不在一个平面上。

端盖也为上、下剖分结构。较大直径的电机,上半端盖又分为两半,而且上半端盖没有止口,以便于拆卸。

机座结构应满足磁路对称方面的要求,对同轴双电枢电机,独立的两磁路系统,其机座应使用材质相同、导磁性能尽量一致的材料。

7.2.3 定子磁路系统

推进电机的定子磁路系统一般由主磁极、换向极、励磁绕组、换向极绕组、补偿绕组和极间连线组成。对大功率的直流推进电机一般须采用补偿绕组,增加抗环火的能力。

主磁极应采用优质冷轧硅钢片叠压而成,换向极应根据换向设计要求来确定是采用薄钢板或硅钢片叠压结构。主磁极、换向极与机座的连接固定用螺栓,并考虑有足够的调整垫片,以便必要时调整气隙来调整换向性能。

各磁极绕组的对地绝缘性能很重要,主磁极和换向极推荐采用真空压力浸漆,极间连线应包有足够的绝缘,以防凝露或积水导致磁路系统的绝缘电阻偏低,影响电机的正常使用。

磁路系统各绕组之间的连线方式应使各极磁动势相等、极性正确、轴电流和外磁场最小。

磁路系统的极间连线必须考虑机座的剖分要求,在併合面附近分断并采用螺栓连接。

7.2.4 电枢

推进电机电枢一般需要采用斜槽,电枢铁心由高导磁、低损耗电工硅钢片叠制成,若采用扇形片叠压,扇形片间接缝应逐层交错放置,并应使磁性对称。叠片应通过穿过铁心的拉紧螺杆同压板一起牢固地压紧。为防止在拉杆内产生涡流损耗,拉紧螺杆不宜装在过于靠近铁心外缘的地方,且必须仔细地加以绝缘。

直流推进电机电枢直径较大时,考虑转轴加工和锻造的生产难度,同时为了减少质量,在电枢铁心和轴之间另装电枢支架,电枢支架用钢板焊接而成,设计时还需考虑电机通风冷却的要求。根据推进电机的电枢铁心长度,可采用轴向通风或轴向、径向混合通风。

7.2.5 换向器

换向器是直流推进电机的关键部件,在整个寿命周期内换向器必须保持良好的状态,不得产生有害变形,换向器外圆跳动应小于规定值。在船舶大修期,若需要车换向器外圆,仍要保证足够的片间压力。

直流推进电机的换向器一般采用螺杆紧固式拱形换向器,升高片与换向片间用硬焊方法联结,机械强度高,接触电阻小。换向器可通过螺栓和销钉与电枢支架紧固,升高片不易发生因疲劳折断的事故;电枢绕组可以在套轴前进行嵌线、浸漆工序,对双电枢电机更容易实现真空压力浸漆(VPI),对提高电机的性能极其有利。

换向器必须具有很好的防潮性能,换向器端部V形环外边缘与套筒、压圈结合处必须密封可靠,并有足够的爬电距离。V形环和换向片、套筒、压圈之间的空腔可进行灌胶处理。

7.2.6 刷架装置

刷架装置应有可靠的坚固性和足够的刚度,使直流推进电机在各种船用环境条件下不产生有害变形和机械振动,接

头不发生松动,保证刷架始终处于中性线处。

刷杆座应可以旋转,且设有复位标记,以便对电刷和刷握进行维护调节和更换;刷杆座应为分半结构,便于拆装。

直流推进电机为可逆转电机,需要采用合理的电刷和刷握型式;为防止维护保养时电刷装反,电刷设计时应考虑有防错标记。

7.3 设计特点

直流推进电机的设计多为单台设计,其设计任务是在满足总体要求的功率、电压和转速下,进行多方案、多工况、多电压的设计优选,并同时满足外形尺寸、质量和维修空间的限制。

7.3.1 转换点选择

转换点选择是蓄电池供电直流推进电机设计的特点。

调速范围在1:2.5以内者,用一个转换点,分两个调速区;在1:5以内者,用两个转换点,分三个调速区;超过1:5的可用三个转换点,分四个调速区。

为获得最小的电机有效部分的尺寸,兼顾保证电机的换向和发热参数,转换点通常取在半功率处,这时,电机的转速为

$$n_1 = n_0 \sqrt[3]{P_1/P_0} = 0.795n_0$$

式中: n_0 , P_0 为基本工作状态时的转速和功率; n_1 , P_1 为第一转换点时的转速和功率。

直流推进电机在基本工况时,负载很大,与之相对应的磁通只有最大磁通的70%~85%;转换点工况时,功率下降,负载电流减少。因此,第一转换点前的电负荷并不严重,而磁通较大;第一转换点后因电枢电压减半,其电枢电流为最大工况,接近或超过基本工况的电流。设计时需对多种工况进行校核计算。转换点后的换向器和电枢发热严重,一般不允许长期运行,需规定持续运行的时间限制值。

如果最小转速低于最大转速的40%~50%时,需要选择第二转换点,第二转换点的选取方法与第一转换点相同。第二转换点的功率较小,它对电机尺寸的确定不如第一转换点重要,对应的磁通值不会达到最大值,但对励磁绕组的发热需要核算。

7.3.2 主要尺寸和外形尺寸的估算

在实际工作中,完整的电磁计算和精确的电磁场分析通常在技术设计和优化设计阶段进行,而在方案论证阶段通常需要配合总体布置进行电机的主要尺寸和质量的估算。

推进电机功率大,转速低,电机主要尺寸电枢直径 D_a 和电枢铁心长度 l_a 主要由推进电机的最大转矩决定,而不是最大功率决定。选取电枢直径时可以从给定的外形尺寸出发,根据基本工况的转矩和已制造过的类似电机的相关尺寸作为参考,选择电枢直径进行方案计算比较。

根据直流电机的主要尺寸的基本关系式(5.3-3)和电抗电动势的基本公式(5.3-4)等导出电枢直径和电枢铁心计算长度的估算公式

$$D_a^2 l_a = 6.1 \times 10^{11} P_a / (\alpha_i AS B_a n) \quad (5.3-3)$$

$$e_r = 2 \xi W_a V_a l_a AS \times 10^{-6} \quad (5.3-4)$$

上式中的相关系数根据经验取值范围可得出电枢直径和电枢铁心计算长度的估算公式分别为

$$D_a \approx 7.8 \times 10^{-2} P_N \quad (\text{cm})$$

$$l_a \approx 3.034 \times 10^7 / (0.8 P_N n) \quad (\text{cm})$$

电机的电枢直径 D_a 与机座外径 D_1 之间可按式计算

$$D_1 = (1.3 \sim 1.6) D_a \quad (\text{多极电机取下限})$$

电机的两轴承外缘轴向尺寸总长由电枢铁心长度 l_0 、换向器长度 L_K 、轴承总长 L_n 、电枢绕组端伸长度 L_S 、结构部件的长度和进风口间隙 ΔL_K 之和确定。对不同的电枢结构分别按下式计算

单电枢电机的轴向长度为

$$L_j = l_0 + L_K + L_n + L_S + \Delta L_K$$

单电枢双换向器电机的轴向长度为

$$L_j = l_0 + 2L_K + L_n + L_S + \Delta L_K$$

双电枢双换向器电机的轴向长度为

$$L_j = 2(l_0 + L_K + L_n + L_S) + \Delta L_K + (30 \sim 100 \text{ mm})$$

对双电枢推进电机的质量可按下式估算

$$G = 2[40D_a^2 l_0 / \sqrt{p} + (0.2t \sim 0.9t)] (\text{t})$$

式中： p 为极对数； D_a 为电枢直径，m； l_0 为电枢铁心长度，m。

从上式可知，轴承、换向器和结构部件的长度等，结构和风路方面的尺寸在推进电机的轴向总长中占有较大比例，推进电机的质量和体积的减小，除需要优化有效材料的利用率外，其他结构部分的设计和优化也相当重要。

7.3.3 极对数的选择

极对数的选择在直流推进电机的设计中十分重要。当气隙磁密 B_0 和电枢直径 D_a 一定时，电机中总磁通 $2p\Phi = \text{常数}$ ，磁极数增多，则每极磁通 Φ 减少，电枢和机座的截面可以相应减少，电机的体积和质量会减小。极对数对电机轴向尺寸的影响，主要表现在电枢绕组端伸和换向器有效长度等方面。

当电枢直径 D_a 一定时，电枢绕组端伸和极距成比例变化，极距 τ 减小，使电枢绕组的端伸减小；但当 $2p > 10$ 以后，极对数的增加对电枢绕组端伸的影响已明显减小；当 $2p > 16$ 以后，这种影响已趋于消失。同时每刷杆上的电流减小，换向器长度减短。

当换向器直径 D_K 一定时，在一定范围内，换向器有效长度与极对数成反比。特别对大功率低压电机，由于电枢电流较大，换向器要做得很长，甚至做成双段式换向器。若选择较多的磁极对数，换向器长度可明显减小。

另一方面，随着极对数的增加，极窗减小，为避免主磁场对换向极磁场的影响，极弧系数要适当降低，电枢铁心长度趋于增加；极对数的增加，会使磁路定子各绕组布置困难些，电刷和刷杆相应增加，刷杆的布置和结构设计空间减小；换向器和电刷的维护保养空间会比较相对小些。

在特定的环境和使用条件下，由于对电机的外形尺寸和质量，特别是径向尺寸有着严格限制的情况下，如果电机的换向、电位条件和结构上允许，适当选取较多的极对数是正确的，由此带来的一些不利的方面，应尽量通过调整其他参数来平衡。

从国外已制造的船舶推进电机的统计数据看，与一般用途电机相比，也倾向于选用较多的极数，如图 5.3-10。

7.3.4 极限功率

在现有的材料、设计和工艺水平条件下，在一定的直径和参数下，估算推进电机所能输出的最大功率。

直流推进电机的最大电负荷和最大磁负荷有时不在同一工作状态时出现，计算功率大于电磁功率。在同样输出功率时，与一般的恒速、恒压电机相比，推进电机的体积和质量较大些，实际负担的功率比电磁功率大得多。

直流推进电机的极限功率受到一些因素的影响，如换向

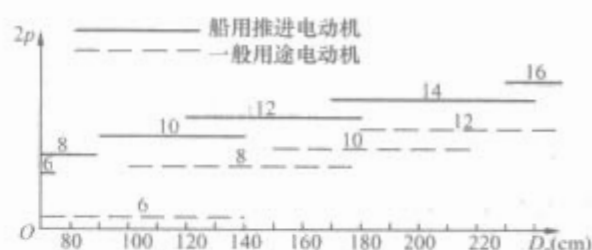


图 5.3-10 极对数与电枢直径的关系

器上的平均片间电压、电抗电动势、电磁负荷、热负荷和机械强度等。目前国内外舰艇直流推进电机已普遍使用短时工作制，一般短时工作制比小时工作制的功率约增加 20% 左右。

7.4 维护保养

为了保证直流推进电机在寿命期内的可靠运行，应严格按照使用维护说明书规定的内容对设备进行日常的维护和检查。

7.4.1 清洁

正常情况，每隔 6 个月必须用软管以干燥、洁净的压缩空气吹除电机内部和外表面的灰尘等（压力不能超过 3 个大气压）。

7.4.2 换向器

清洗换向器时，要用干净的软抹布浸无水乙醇（挤去多余的无水乙醇）擦洗，然后用清洁干燥的抹布擦干。对换向器禁止使用尖锐的工具清理和润滑介质。

换向器表面粗糙时，须研磨换向器。研磨工作应在换向器冷状态下进行，用细砂纸装在特制的磨架上来研磨。禁止用金刚砂纸来研磨换向器。

7.4.3 电刷与刷握

当电刷磨损至电刷顶面与刷盒上沿平齐时，应更换电刷，复装时不能装反。

在更换大量电刷或研磨换向器后，电机须空载运行磨刷 2h，再带载 40% 磨刷，直至电刷与换向器表面接触面 $\geq 80\%$ 。磨电刷后，必须清理并用风吹净换向器及电刷机构。

刷盒的下边缘与换向器表面径向距离、弹簧对电刷的压力均应满足设计要求。

更换电刷或刷握以及在电刷机构上做其他工作时，允许转动刷杆座，但更换后刷杆座必须按照生产厂给出的标识线准确复位。

7.4.4 绝缘电阻

电机停止使用期间，每周应测量一次绝缘电阻，当电机绝缘电阻值低于 $0.5 \text{ M}\Omega$ 时，电机的加热器应投入工作。

7.4.5 滤料

当推进电机累计运行 1000h 或电机出风温度高于允许值时，必须检查、清洗过滤器滤料。

8 船舶永磁推进电动机

8.1 基本原理、分类

永磁电机采用永磁材料励磁，没有励磁绕组和励磁损耗。与一般电励磁电机相比，永磁电机具有效率高、体积小等优点，特别适用于船舶推进电机。

在船舶推进电机上使用的永磁材料主要为钕铁硼和钕钴两种稀土永磁材料。钕铁硼具有较高的磁能积，价格便宜，但温度系数偏大，居里温度低。钕钴具有较高居里温度，温

度系数小，但价格贵，磁能积低。

由于永磁体的结构和布置形式非常灵活，永磁电机具有多种不同的拓扑结构。适用于船舶的永磁推进电机有如下分类方式：

(1) 按气隙磁通方向，可以分为径向磁通永磁电机、轴向磁通永磁电机和横向磁通永磁电机。见图 5.3-11。

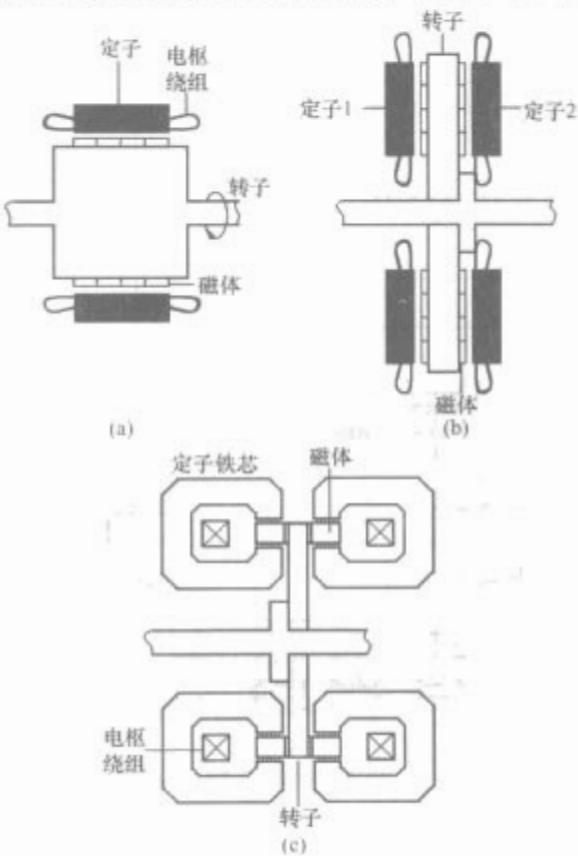


图 5.3-11 永磁推进电机三种基本拓扑结构
(a) 径向磁通；(b) 轴向磁通；(c) 横向磁通

(2) 按电枢绕组反电动势波形，主要分为正弦波永磁电机和方波（矩形波）永磁电机。

自从德国于 20 世纪 80 年代中期开始研制船舶永磁推进电机以来，电机的功率等级有很大的提高，性能也有明显的改善。在较早期的研制中，均采用径向磁通结构，这与常规的交流同步电机相似，因此，在减小电机的质量和体积方面都受到一定的限制。后来，采用轴向磁通结构，使得电机体积更小，质量更轻。此外，又进行了横向磁通结构永磁推进电机的研究工作，这种新型永磁推进电机的性能比轴向磁通永磁推进电机又有进一步的改进，使之更适合于大功率低速的船舶推进的需要。

表 5.3-3 为 20MW 船舶推进电机分别采用径向磁通、轴向磁通和横向磁通结构时的设计参数比较。

表 5.3-3 径向、轴向和横向推进电机设计参数比较

类型	横向	横向	轴向	径向	径向
励磁方式	永磁	永磁	永磁	永磁	感应
功率 (MW)	20	20	20	20	20
速度 (r/min)	180	180	180	180	180
气隙剪应力 (kN/m ²)	120	100	100	100	100
质量 (t)	40	65	95	80	70
转换器 (MVA)	50	33.3	25	23.5	25

8.2 径向磁通永磁推进电机

径向磁通永磁推进电机按永磁体布置方式不同，主要分

为表面式磁极结构、切向式磁极结构和混合式磁极结构三种。图 5.3-12 为结构示意图。

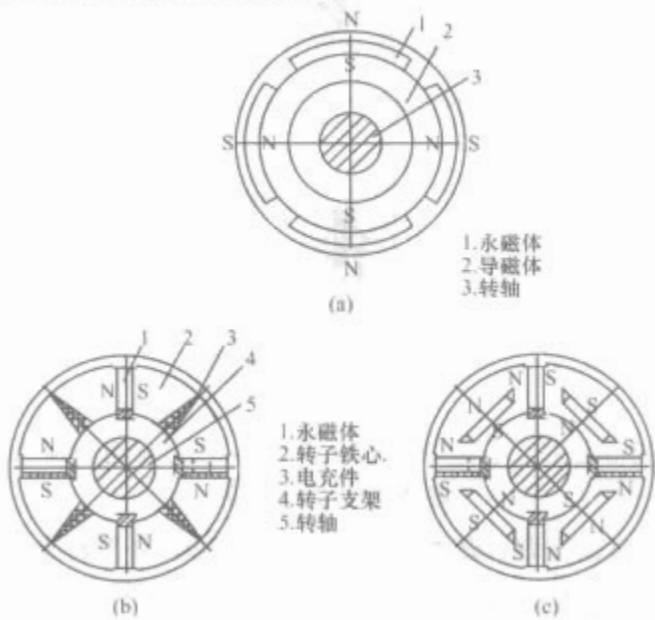


图 5.3-12 径向磁通永磁推进电机结构示意图
(a) 表面式转子磁路结构；(b) 切向式转子磁路结构；
(c) 混合式转子磁路结构

径向磁通永磁推进电机的代表为德国 Siemens 公司研制的 PERMASYN 永磁推进电机。

PERMASYN 永磁推进电机专门为新一代潜艇的推进系统而设计的多相永磁同步推进电机，输出功率等级从 1.7MW 到 5MW 不等。

PERMASYN 永磁推进电机主要设计特性如下：

- (1) 电机、逆变器和监控系统一体化。
- (2) 淡水一次冷却，海水二次冷却。
- (3) 结构噪声和空气噪声低。
- (4) 效率高，特别在部分负载范围。
- (5) 尺寸小，质量轻。
- (6) 冗余设计，有效利用率高。
- (7) 电磁兼容性能好。

PERMASYN 永磁推进电机技术数据见表 5.3-4。

表 5.3-4 PERMASYN 永磁推进电机技术数据表

型号	额定输出 (kW)	额定转速 (r/min)	净重 (t)	工作电压范围 (V)	额定电流 (A)	上半部半径 (mm)	主体直径 (mm)	主体长度 (mm)
1FR6134-	1700	120	28	300~560	<6000	2080	2240	1590
1FR6439-	3300	150	50	520~830	<6700	2500	3340	2310
1FR6439-	3900	150	54	520~830	<8000	2500	3340	2310
1FR6839-	5000	150	71	550~830	<9600	2700	4000	2800

8.3 轴向磁通永磁推进电机

轴向磁通永磁电机又称为盘式永磁电机，其拓扑结构见图 5.3-11(b)。由于电机的形状扁平，能方便地作成单元电机，随意地搭配，从而像搭积木似地满足各种船舶不同推进功率的需要，将电机的设计、制造费用降到最低，并大大缩短设计制造周期。

1990 年，美国 Kaman 公司与 Newport News 船厂共同研制 1.8×10⁴ kW (25 000 马力) 轴向磁通永磁推进电机，结构见图 5.3-13。

该电机采用中间转子结构，可使电机获得最小的转动惯量和最优的散热条件。由两个定子和单转子组成双气隙。每个定子上有多个线圈，每个线圈由单独的逆变器供电。转子

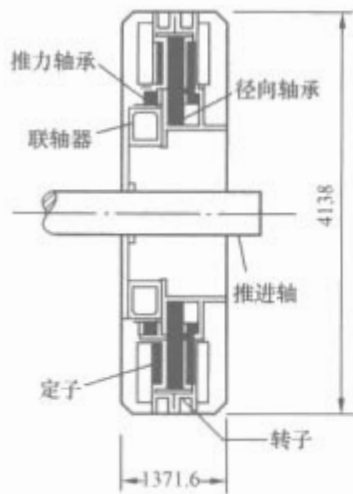


图 5.3-13 1.8×10⁴ kW(25 000 马力)轴向磁通永磁推进电机结构图

上安装有钕铁硼永磁体，磁场方向为轴向。环形转子由径向轴承和推力轴承支撑，并在电机转子的中空部分安装减振联轴器，使电机结构紧凑，质量较轻。定子水冷，转子通过轴承润滑油冷却。电机的逆变器放在电机两侧的外部的控制柜中。

两个定子相互错开一定的机械和电气角度，以避免起动死区，并减小电磁转矩脉动。

8.4 横向磁通永磁推进电机

横向磁通电机，其定子和转子中的磁通方向限定于与旋转方向垂直的平面中。英文名称为 transverse flux motor，简称为 TFM。这种新型电机技术是德国 Branschweig 技术大学的 Herbert Weh 教授及其合作者于 1986 年提出的，如图 5.3-14。

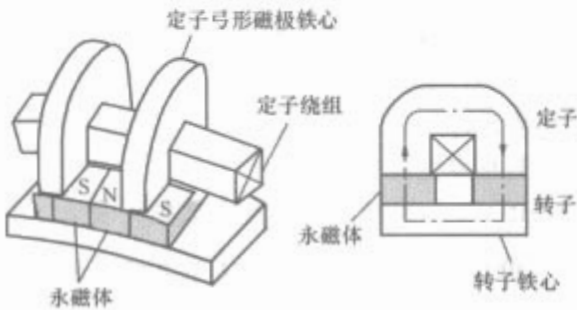


图 5.3-14 横向磁通电机的一种结构型式

从图 5.3-14 可见，永磁体产生的磁通通过定子弓形铁心与定子绕组相交链。这样，增大铁心截面可使磁通增加而不占用电枢绕组所需的空間。因而，克服了传统径向磁通和轴向磁通电机结构中绕组和磁路互相争抢有效空间所带来的限制，可大大提高电机功率密度。

横向磁通电机（TFM）的主要特点如下：

- (1) 在一定转速下，TFM 的功率随极对数增加而增加。
- (2) 电机转矩密度更大。在低速时，保持高效率和大转矩。
- (3) 当转矩最大化时，功率因数减小，导致配套的变换器和电网容量需求增加。
- (4) 电机安装复杂，制造困难。

英国正着手开发 20MW 横向磁通永磁推进电机，用于下一代水面战舰的电力推进系统。Rolls -Royce 已制造出 2MW 横向永磁推进电机小比例样机。

20MW 横向磁通永磁推进电机技术参数见表 5.3-5，电机结构示意图见图 5.3-15。

表 5.3-5 20MW 横向磁通永磁推进电机技术参数

额定轴功率	20MW	每盘转子轮缘数	4
额定转速	180r/min	磁性材料	NdFeB
转速范围	-100/0/100%	气隙剪应力	120kN/m ²
转换器的直流环节电压	5000V	额定效率	>98%
优选冷却方式	水冷	总直径	2.6m
极数	130	总长	2.6m
频率	195Hz	轴直径	500mm
相数	16	估计总质量	39t
盘数	4	—	—

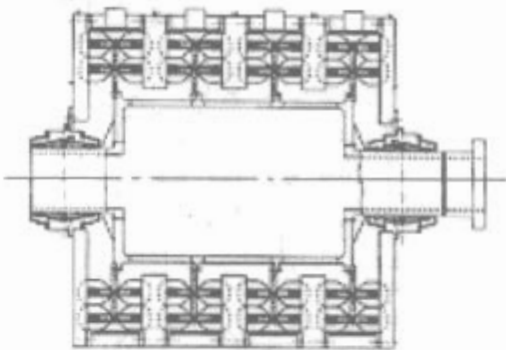


图 5.3-15 20MW 横向磁通永磁推进电机结构示意图

9 交流推进电机

9.1 特点

在变频调速技术成熟以前，由于交流电机调速性能的限制，交流推进电机主要用于机动性要求不高的船舶，或者作为某些船舶的一种辅助推进。例如，作为辅助推进的主动舵电机和用于驱动变螺距推进器的交流推进电机。

随着电力电子技术、数字控制技术、现代控制理论特别是矢量控制技术和直接转矩控制技术的发展，交流推进电机的调速性能已可与直流推进电机的调速性能相媲美。在国外的商用特种水面船舶中交流推进电机的应用已十分广泛，国内电力推进船舶中交流推进电机的应用也正在起步。

交流推进电机与直流推进电机相比，具有以下优点：

- (1) 交流推进电机的极限容量大。由于交流推进电机没有换向器，因而其极限容量 P_n 远远大于直流推进电机的极限容量。
- (2) 降低了电机的总损耗，提高了效率。同功率等级交流推进电机与直流推进电机相比，效率通常高 2%~3%。
- (3) 可以采用较高的电压。目前，直流电力推进装置采用的最高电压为 1000V，而交流电力推进装置的电压可达 6300V 或 7500V，能够减轻电力推进设备的质量。
- (4) 交流推进电机的结构比直流推进电机的结构简单，因而，交流推进电机维护方便、成本低廉。

9.2 类型

可以作为动力型的交流电机，原则上都可以作为交流推进电机。但是，实用中主要有以下几种类型：

9.2.1 绕线转子异步推进电机

在绕线转子异步推进电机转子电路中，串联附加电阻

(或电阻、电抗的组合电器),用接触器控制这些电阻接入电路或被短路,从而改变异步推进电机的机械特性,达到调速的目的。

这种推进方式的最大优点是线路简单、可靠、成本低,控制也很方便。它的主要缺点是调速范围小,低速时效率很低,能量大量损耗。因此,它只适用于低速运行时间短,调速范围小,要求机动性不高的中小功率的电力推进。例如,某深潜器母船采用这种推进方式驱动侧向推进器,推进电机功率为 95kW,380V;日本建造的“黑潮丸”布缆船,艏部装有一台 600kW 推进电机的侧向推进器,艉部装有一台 375kW 推进电机的侧向推进器。

9.2.2 笼型异步推进电机

笼型异步推进电机在船舶电力推进中的应用分为调速和不调速两种。不调速笼型异步推进电机主要应用于侧推。

笼型异步推进电机的调速方式主要有:变极调速——改变电机极对数;调压调速——改变定子供电电压;变频调速——改变定子供电频率。

变极调速为有级调速,调速范围窄且不连续;调压调速实际是一种变转差率调速方式,存在转差损耗,产生大量的转差功率并消耗在转子电路上,使转子发热,系统效率低。这两种调速方式只在小功率推进装置中采用;变频调速是异步推进电机的主流调速方式,目前,变频调速异步推进电机已应用于新型电力推进船舶,其单机功率已达到 10~20MW。例如,英国 45 型驱逐舰采用两台 20MW 变频调速异步推进电机作为其推进动力。

9.2.3 同步推进电机

同步推进电机在船舶电力推进中的应用也分为调速和不调速两种。不调速同步推进电机以恒频恒压供电,用于驱动变距螺旋桨。

同步推进电机的调速方式主要为变频调速。同步电动机功率因数高,可以在功率因数为 1 的情况下运行,使变流器的设计容量减小,甚至如果有需要可以超前功率因数运行,能够改善电网的功率因数。对于容量有限的船舶电网来说,可以避免因电网功率因数恶化而带来许多问题。目前,变频调速同步推进电机广泛应用于各类电力推进船舶,单机推进功率大于 10MW 的船舶推进电机大多采用同步推进电机。

9.3 电磁设计

交流电机电磁设计方法在电机工程卷中已有论述,本节仅补充直接驱动船舶螺旋桨的变频调速交流推进电机电磁设计要点。

9.3.1 基本数据及要求

9.3.1.1 功率、转矩和转速

推进电机的功率、转矩和转速是船舶总体对推进电机提出的基本要求,也是推进电机设计的基本数据,推进电机必须依据船舶总体提供的螺旋桨特性曲线进行设计。

需要注意的是,当船舶在风浪中发生纵摇和侧摇时,推进电机的功率和转矩会随螺旋桨浸入的深度而变化,同时考虑到螺旋桨特性曲线的计算误差,推进电机设计时必须留有足够的储备转矩和功率容量。

9.3.1.2 电压和相数

交流推进电机电压等级的选取除与输出轴功率有关外,还与变频电源所采用电力电子器件的耐压等级、结构型式、电源相数有关,目前尚未标准化。根据已建造和使用的交流电力推进船舶来看,随输出轴功率不同,所使用的电压等级上限大致如下:

1000kW 以下	525V
1000~2500kW	1050V
2500~15 000kW	3150V
15 000kW 以上	6300V

无论是同步推进电机还是异步推进电机,其相数不局限于三相绕组。实际上,特别是大功率交流推进电机大多采用多相绕组。典型的多相交流推进电机有六相双 Y 移 30°绕组、十二相 4Y 移 15°绕组,甚至可采用以五相为子集的十五相绕组。采用多相绕组的交流推进电机可以使转矩脉动减小、运行更平稳,特别是当一相或几相故障时可以使故障相退出,电机降载运行而不必停机,因此可提高推进系统的可靠性,当然推进电机相数越多变频调速控制系统就越复杂,应权衡考虑采用恰当的相数。

9.3.2 电磁设计要点

电磁设计是在明确技术要求的前提下来确定电机的电磁负荷、有效部分尺寸、绕组数据及性能参数等,在交流推进电机电磁设计中需要考虑变频电源及控制策略的影响,关注功率密度、噪声振动和冗余设计等因素。

9.3.2.1 主要尺寸与电磁参数的关系

电机的主要尺寸决定了其外形尺寸和质量,对于船舶推进电机而言,外形尺寸和质量具有举足轻重的地位。交流推进电机的主要尺寸主要取决于气隙剪应力和电磁负荷水平。

(1) 气隙剪应力。衡量电机有效部分是否优化的重要指标是气隙剪应力,其定义为电枢单位表面积的平均电磁切应力,由此可知,气隙剪应力越大,电机的主要尺寸越小。表 5.3-6 给出了几种典型异步电机气隙剪应力。

表 5.3-6 几种典型异步电机气隙剪应力水平

序号	电 动 机	气隙剪应力 (kN/m ²)
1	标准工业用大容量异步电动机	13
2	高性能工业用 1500r/min 的异步电动机	35
3	低速轧钢电动机(1992 年)	45
4	美国海军 IPS 用异步推进电机,19MW, 150r/min(1997 年)	76
5	英国 45 型驱逐舰用异步推进设计,20MW, 180r/min(2002 年)	100

(2) 电磁负荷。

1) 电负荷。交流推进电机电负荷的选择与电源谐波含量、绝缘耐热等级、绝缘工艺和冷却型式有关。对于现代大型交流推进电机,在采用强迫通风和 VPI 浸渍技术的 F 级绝缘情况下,考虑谐波的影响,发热参数可控制在 4000A²/(cm·mm²) 左右,电流密度可控制在 5A/mm² 以下,以保证推进电机有较高的效率,并有足够的储备转矩和功率容量。对于采用介质冷却方式的推进电机,发热参数可大大提高,但是冷却系统较复杂,需要综合考虑。

交流推进电机最终发热参数的选取需要开展精确的冷却与发热分析计算,对于高水平发热参数的选取还需要通过相关试验验证,确保最高热点温度低于绝缘材料耐热等级温度。

2) 磁负荷。磁负荷的选择一般与供电电源频率有关,当供电电源频率较低时,可取较高气隙磁密,但是气隙磁密的提高受铁心所用硅钢片的饱和所限制。从船舶推进电机减振降噪的角度考虑,气隙磁密不宜过高,因为电机径向力与气隙磁密的平方成正比,而振动的幅值与径向力成正比,声

功率近似与振动幅值的平方成正比,故降低气隙磁密可降低径向力幅值及噪声。一般来说,综合考虑气隙磁密上限取1T左右。

3) 电磁负荷比值。由电机原理可知,电机定转子绕组漏电抗与电负荷成正比而与磁负荷成反比。因此,对于电压型变频器供电的电机应取较大的电负荷和较小的磁负荷。而对于电流型变频器供电的电机则应取较小的电负荷和较大的磁负荷。然而需要注意的是,电机的最大效率一般出现在电机的铜损耗和铁损耗相等或相近时,在选择电磁负荷时,应适当控制电磁负荷的比值,此值过大或过小都将导致电机效率或功率因数的降低。

9.3.2.2 磁路

交流推进电机的磁路设计是决定电机参数的重要环节,其计算的准确性将直接影响运行性能的预测。在进行磁路计算时,对于普通系列的电机,由于参数水平不高,不同的计算方法所造成的误差是工程上可以允许的,然而,对于高参数水平大型交流推进电机的磁路计算必须认真考虑,否则将造成设计上的失败。大型交流推进电机的磁路计算通常需要结合数值计算方法开展电磁场分析与参数计算。

9.3.2.3 参数

为了减小电流谐波,提高功率因数和改善换流性能,在设计电压型变频器供电的电机时,希望有较大的定转子漏电抗;对于电流型变频器供电的电机而言,情况则相反,为了减小最大换流时间,限制换流时变频器和电机上出现的过电压,要求换流电路的总电感越小越好,从抑制电压谐波的角度出发,也希望减小电机绕组的漏电抗。

因此,不同类型变频器对电机参数的要求是不一样的,而且是互相矛盾的,因而应当区别对待。

9.3.2.4 电磁方案

大型交流推进电机电磁方案的最终确定需要通过运行性能仿真计算综合考虑变频电源及控制策略的影响,需要通过电磁场分析与参数计算优化磁路设计,需要通过冷却与发热分析计算确定电负荷的选择,需要通过对结构方案的应力场和动力学分析计算优化电磁激振力降低对噪声振动的影响。

9.4 结构设计

交流电机结构设计在电机工程卷中已有论述,此节仅补充船舶直接驱动螺旋桨的变频调速交流推进电机结构设计要点。

9.4.1 要求

大型交流推进电机的结构质量在电机总质量中占有大部分的比例,因此,结构优化设计对于减轻结构质量、减小电机体积有着举足轻重的作用。同时,结构优化设计对增强抗冲击性、提高可靠性和减振降噪等方面也具有重要的作用。

传统的经验设计和静态设计方法已不能适应高转矩密度推进电机结构设计的需要,必须采用能反映电机实际运行工况的动态分析与设计技术,从总体把握电机结构的动态性能,为提高结构关键部件及整体的动强度和动刚度提供数据,进行结构优化设计,以减轻结构质量,进一步解决非正弦供电所带来的噪声和振动问题。

9.4.2 结构设计要点

9.4.2.1 定子

交流推进电机转速范围广,加上变频电源中高次谐波低频脉动转矩等问题,使定子受力极为复杂,需要开展定子模态分析和动力学分析确定合理的结构。对于定子的结构设计,应把提高振动和噪声的问题放在一个很重要的位置上,提高定子结构件的刚度,控制噪声的进一步放大和外辐射等

都是行之有效的措施。

9.4.2.2 转子

转子结构设计时需要根据载荷谱进行考虑脉动谐波转矩情况下的扭振计算,以较好解决系统在所有工况下所产生的激振频率均能避开设备的固有频率。

9.4.2.3 轴承

轴承结构设计时需要考虑工作的可靠性及维修性,值得注意的是,大型交流推进电机通常采用滑动轴承,需要防止轴电流的产生。一般来说,除两端采用绝缘轴承外,还需要接地电刷,接地线最好用编织线。

9.4.2.4 风路

对于通风冷却方式来说,进行总体结构设计时,需要结合通风冷却系统一并考虑风路的设计,风路的设计往往需要开展流体分析计算或模拟风路试验研究。

10 船舶推进电机试验

10.1 试验项目

船舶推进电机必须按 GB/T 755《旋转电机基本技术要求》、GB7060《船用电机基本技术要求》以及各类产品技术条件的规定,按 GB/T 1311《直流电机试验方法》、GB/T 1029《三相同步电机试验方法》和 GB/T 1032《三相异步电机试验方法》进行各项试验。试验项目见表 5.3-7。

表 5.3-7 船舶推进电机试验项目

试验项目	直流推进电机	同步推进电机	异步推进电机	永磁推进电机
电机各绕组的绝缘电阻测定	√①	√①	√①	√①
绕组在实际冷状态下直流电阻测定	√①	√①	√①	√①
空载特性的测定	√①	√①	√①	√①
温升试验	√	√	√	√
过载试验	√①	√	√	√①
超速试验	√①	√①	√①	√①
匝间绝缘试验	√①	√①	√①	√①
耐电压试验	√①	√①	√①	√①
效率测定	√	√	√	√
振动测定	√①	√①	√①	√①
噪声测定	√	√	√	√
纵倾试验	√	√	√	√
横倾和横摇试验	√	√	√	√
电磁兼容测定	√	√	√	√
转动惯量测定	√	√	√	√
轴电压测定	√	√	√	√
电感测定	√	√	√	√
电加热器试验	√	√	√	√
湿热试验	√	√	√	√
霉菌试验	√	√	√	√
盐雾试验	√	√	√	√
电压脉动系数测定	√			
无火花换向区域测定	√			
稳态短路特性的测定		√①		
堵转电流和堵转转矩的测定		√	√①	
功率因素及转差率的测定			√	

① 为检查试验项目,其余为型式试验项目。

10.2 试验条件及设备

10.2.1 交流推进电机试验电源

- (1) 试验电源的平衡度要求。电压的负序分量在消除零序分量的影响后，应小于正序分量的0.5%。
- (2) 试验电源的波形正弦性要求。电压波形的瞬时值与基波分量瞬时值之差不应超过基波波幅的2.5%。

10.2.2 直流推进电机试验电源

直流推进电机试验电源有直流发电机组、静止整流电源、蓄电池组等。整流电源输出电压、电流的纹波系数（最大波幅—最小波幅）/（最大波幅+最小波幅）小于0.1。

10.2.3 船舶推进电机试验系统框图

船舶推进电机试验系统框图见图 5.3-16 所示。船舶推进电机试验系统主要由试验电源、试验负载、数据采集分析系统以及辅助系统组成。

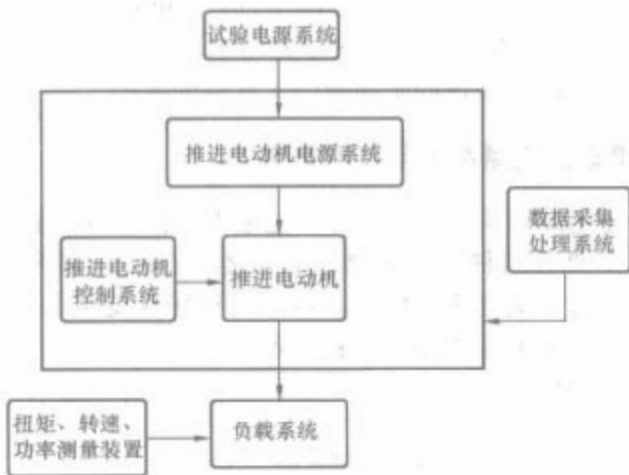


图 5.3-16 推进电机试验系统框图

10.2.4 试验负载设备

由于船舶推进电机的功率达到数兆瓦以上，而且转速较低，从每分钟几十转到每分钟二百多转变化，其试验负载设备的选择比较复杂。主要有两种方案：直流发电机+电动—发电机组负载和水力测功器负载。

- (1) 直流发电机+电动—发电机组负载。发电机组负载框图见图 5.3-17。被试船舶推进电机 M1 拖动直流发电机 G1 发电，供电给直流电动机 M2。直流电动机 M2 拖动同步发电机 G2 发电，回馈给电网。

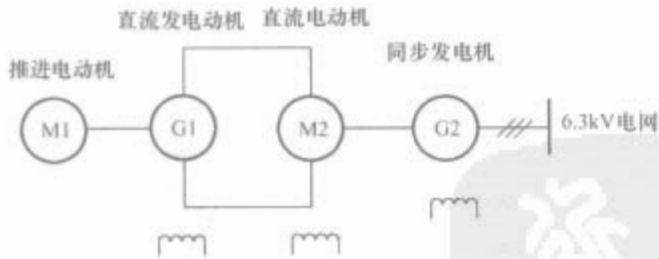


图 5.3-17 发电机组负载框图

优点是：能量反馈回电网，节约能源。缺点是：设备庞大，控制复杂。因不能模拟螺旋桨特性，不能进行推进电机的瞬态调节试验。

- (2) 水力测功器负载。水力测功器工作时，转子叶轮旋转。在摩擦力和离心力的作用下，水力测功器内的水被抛向外壳的内腔，形成一个旋转水环。水环的转动受到外壳内壁摩擦力的阻碍，外壳对水环产生制动力矩。此时，外壳本身也受到一个与制动力矩大小相等方向相反的、测力机构产生的反力矩。在这个力矩的作用下，使外壳沿动力轴转动的方向旋转，在转过一定角度以后为测力机构所平衡。测力机构指针所指示的扭矩值即等于输出轴的扭矩。

在工作过程中，水不断从转子获得速度，又受内腔壁的阻力影响，动能转化为热能。热水由出水管排出，并由进水管补充冷水。

水力测功器负载曲线见图 5.3-18。

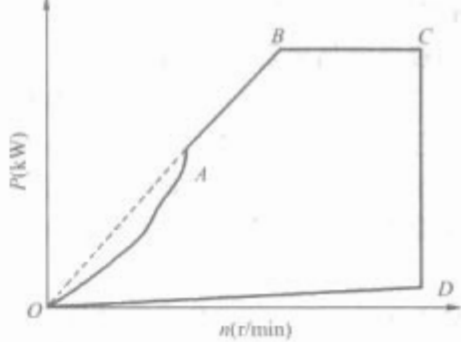


图 5.3-18 水力测功器负载曲线

OA 段：在内腔灌满水或一定压力下的吸收功率曲线，即随着转速升高，功率与转速的关系为

$$P = K_U n^3 D^5 = K'_U n^3 \tag{5.3-5}$$

式中：D 为转子直径；K_U 为结构阻力系数，又称马力机系数。

A 点为结构强度允许的最大工作转矩所对应的功率点。

AB 段：保持最大工作转矩时功率吸收特性。

B 点为水力测功器允许的最大出水温度时的功率点。

BC 段：最大允许出水温度时的吸收功率曲线。

CD 段：水力测功器所允许的最高转速。

DO 段：水力测功器不加水时的吸收功率曲线（空气摩擦阻力所致），又称空载曲线。

曲线图形 OABCD 所包围的即是水力测功器所能吸收的范围。

由式 (5.3-5) 可见，水力测功器能够较好的模拟螺旋桨的特性曲线。因此，对船舶推进电机进行系统试验时，尤其进行瞬态特性试验时，可以使用水力测功器作为试验负载。

第4章 船舶电力推进的变流与调速

1 船舶电力推进的变流技术

1.1 新型大功率电力电子器件

新型大功率电力电子器件对船舶电力推进技术的发展起到巨大的推动作用。大功率器件按照容量及耐压由高到低主要有 SCR、GTO、IGCT、IGBT / IEGT 等几种, 另外, ETO、MTO、FTO 等器件也具有较好的应用前景。下面简要介绍几种新型大功率器件。

1.1.1 集成门极换流晶闸管 (IGCT)

IGCT 是专门针对中压大功率变流器而设计的一种新型开关器件。它的全称是集成门极换流晶闸管, 其主器件称为 GCT, 是在 GTO 技术的基础上经过一些技术改良后形成的新型器件。把 GCT 和门极驱动电路集成, 称为 IGCT。

GCT 主要特点是: 在 GTO 技术的基础上采用了硬驱动的概念, 实现了单位关断增益, 这大大加快了关断过程, 同时也减小了关断损耗。同时 IGCT 由于采用了独特的缓冲层和透明阳极技术, 把晶闸管和晶体管两类器件的优点结合成一体, 因此在导通期间具有晶闸管的特性, 传导电流大, 通态损耗低, 而在关断时和阻断时具有晶体管的特性, 开关频率高, 无需 dV/dt 缓冲器。另外, GCT 与门极驱动器集成, 简化了控制设计, 也降低了故障率。

IGCT 目前的容量已经达到 $6kV/6kA$ 。国外已经开发了基于 IGCT 的三电平结构系列中压变流器, 可以用于 $310 \sim 5000kW$ 的电机变频驱动, 输出电压等级有 2.3 、 $3.3kV$ 和 $4.16kV$ 三个系列, 冷却方式有风冷和水冷两种, 输入频率为 $50Hz$ 或 $60Hz$, 输出为 $0 \sim 66Hz$ 正弦波, 输入整流为 12 或 24 脉冲方式, 变流器效率为 98% , 功率因数在满载时达到 0.97 以上。

IGCT 已经在许多方面取得了成功。IGCT 在风机、水泵、无功补偿和轧机方面已有大量应用。

1.1.2 发射极关断晶闸管 (ETO)

ETO 目前的最大额定值可以达到 $6kV/4kA$ (ETO4060), 是世界上容量最大的 MOS 控制型电力电子器件。ETO 由 GTO 和 MOSFET 混合而成, 这种结构可以帮助 GTO 实现硬驱动的工作条件。

在总体性能上 ETO 兼有 GTO 和 IGBT 二者的优点: ① GTO 的高压、大电流和低的正向压降; ② IGBT 的电压型控制、低的门极驱动功率 (是同功率 GTO 的 $1/10$) 以及高的开关速度 ($5kHz$); ③ 具有宽的反向偏置安全工作区和无缓冲关断能力。

1.1.3 MOS 关断晶闸管 (MTO)

MTO 是一种混合器件, 与 IGCT 和 ETO 类似, MTO 也是电压控制型器件。

MTO 的功率可以达到 GTO 及 IGCT 的水平, 预期可以达到 $10kV/2kA$ 。目前已经出现的型号为 SDMI70HK 的 MTO 的额定值为: 阻断电压 $4500V$, 额定电流 $500A$, 额定频率 $2kHz$ 。

1.1.4 电子注入增强型门极晶体管 (IEGT)

IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) 是在 IGBT 的技术基础上发展而来的。

IEGT 目前的容量已经达到 $4.5kV/3kA$, 其优越性能非常适合在各种大功率变流器中使用, 凡是使用 GTO 的地方, 几乎都可以用 IEGT 来代替, 例如电子开关、STATCOM、有源滤波器 (APF)、电机驱动等。

除了上述几种器件之外, 谐振门极换流晶闸管 RGCT、高压 HVIGBT、快速关断器件 FTO 等也都是在 GTO 和 IGBT 的基础上发展起来的新型大功率器件。这些器件的出现为大功率电力推进的实现奠定了良好的基础。

1.2 推进变流器类型与技术特点

以主电路结构形式来划分, 船舶电力推进变流器最常见的类型主要有四种: 整流器或斩波器、交—交型循环变流器、交—直—交电流源型变流器 (又称同步变流器)、交—直—交电压源型变流器 (又称 PWM 变流器), 它们可驱动不同类型的推进电机, 如图 5.4-1 所示。另外, 还有一些特

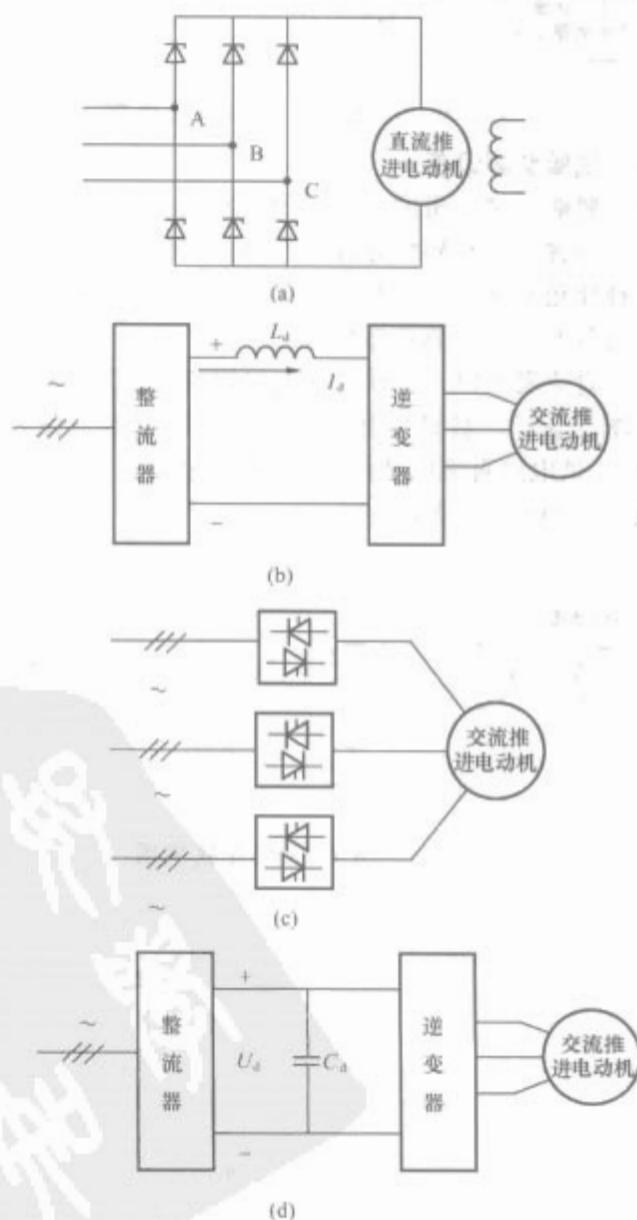


图 5.4-1 常见的船舶推进变流器类型
(a) 三相可控整流器; (b) 交—直—交电流源变流器;
(c) 交—交循环变流器; (d) 交—直—交电压源变流器

殊结构的新型大功率变流器结构形式具有应用前景,如“H”桥逆变器、多电平变流器、矩阵变流器。下面介绍其各自电路的结构形式与技术特点。

1.2.1 整流器和斩波器

在船舶电力推进应用中,整流器可直接驱动直流推进电机实现调速功能。图5.4-1(a)所示为三相全控桥式整流器驱动直流推进电机的结构形式。桥式全控晶闸管整流器给直流电动机供电,具有可控的电枢电压。可控制励磁电流来控制励磁。

在船舶电力推进中常采用12或24脉波不可控整流器,目的是减小谐波,为交流推进逆变电路提供高质量的直流电。输出采用串联和并联结构的12脉波不可控整流器如图5.4-2和图5.4-3所示。

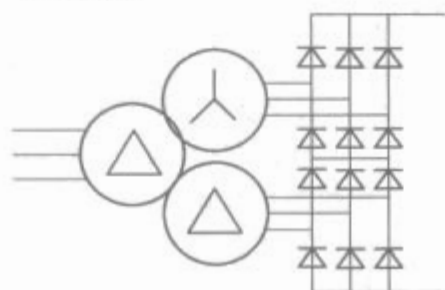


图 5.4-2 串联型输出 12 脉波整流器

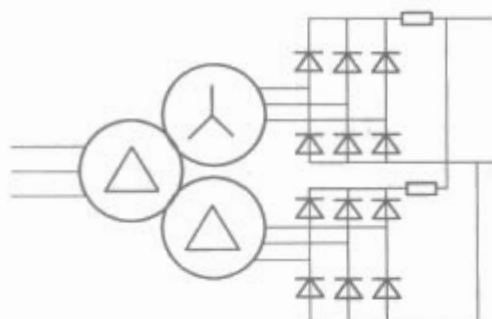


图 5.4-3 并联型输出 12 脉波整流器

直流—直流(DC/DC)变换方式包括斩波降压变换电路、升压变换电路和升降压变换电路三种类型。其中斩波降压电路调速最为常见。这种方式可用于蓄电池供电的潜艇或深潜器设备中,通过斩波改变电压进行直流推进调速。

1.2.2 交—交型循环变流器

交—交型循环变流器(又称周波变流器),是一种不经过中间直流环节,直接将一种频率的交流电变换为另一种频率交流电的变流器。交—交变流器是由一定方式连接起来的晶闸管整流电路所构成,当以一定规律控制各整流电路的输出时,变流器输出端便可以得到由多相整流电压包络线组成的符合规定要求频率的交流电。

单相输出的交—交变流器电路及电压电流如图5.4-4所示。它实质上是一套三相桥式无环流反并联的可逆整流装置,装置中工作的晶闸管关断是通过电源交流电压的自然换相实现的。

交—交变流器的优点在于:其利用电源电压换相,无需专门的换流电路,可以使用容量较大、相对可靠且价格低廉的晶闸管作为功率器件;没有直流环节、一次换能、效率高;过载能力强;流过电动机的电流近似于三相正弦,附加损耗小,脉动转矩小。但交—交变频调速系统的缺点也很明显,主要在于变频范围小,最大输出频率仅为输入频率的1/3;功率因数低,谐波污染严重。

交—交变流器依据电流换向的工作方式可分为无环流和有环流两种。

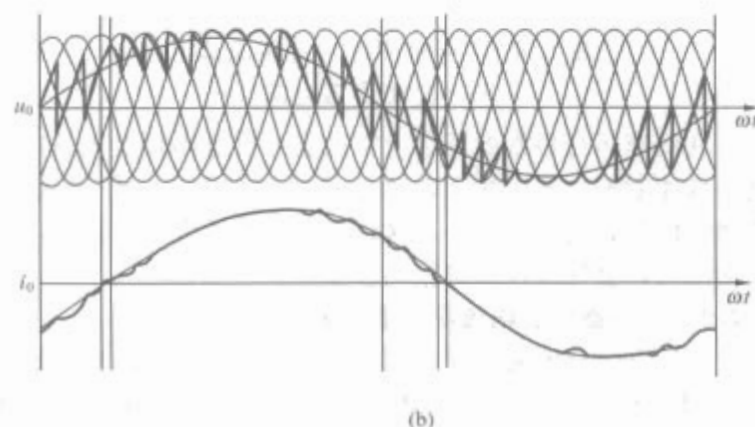
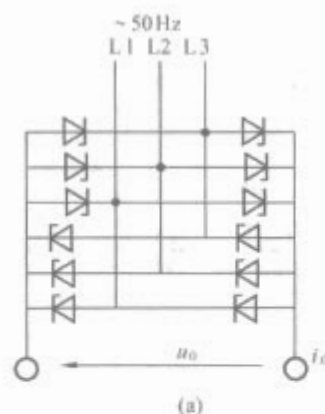


图 5.4-4 单相交—交变流器
电路及电压电流波形
(a) 电路; (b) 波形

1.2.2.1 无环流交—交变流器

图5.4-5、图5.4-6分别为6脉冲和12脉冲桥式无环流三相交—交变流器电路。

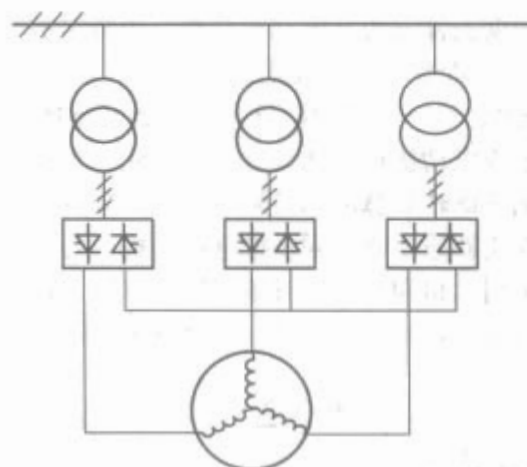


图 5.4-5 6 脉冲桥式无环流三相
交—交变流器电路

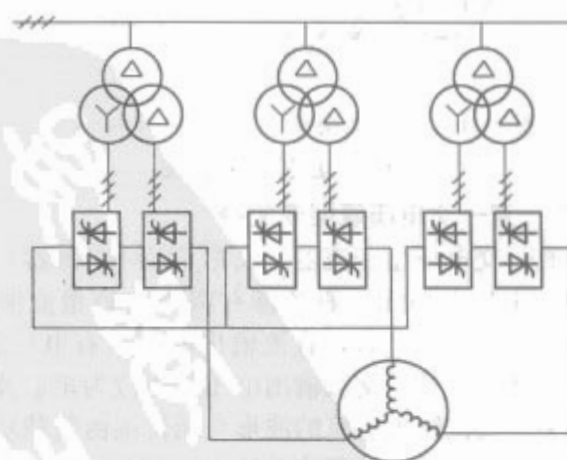


图 5.4-6 12 脉冲桥式无环流
三相交—交变流器电路

1.2.2.2 有环流交—交变流器

图5.4-7所示为6脉冲桥式有环流三相交—交变流器电路。

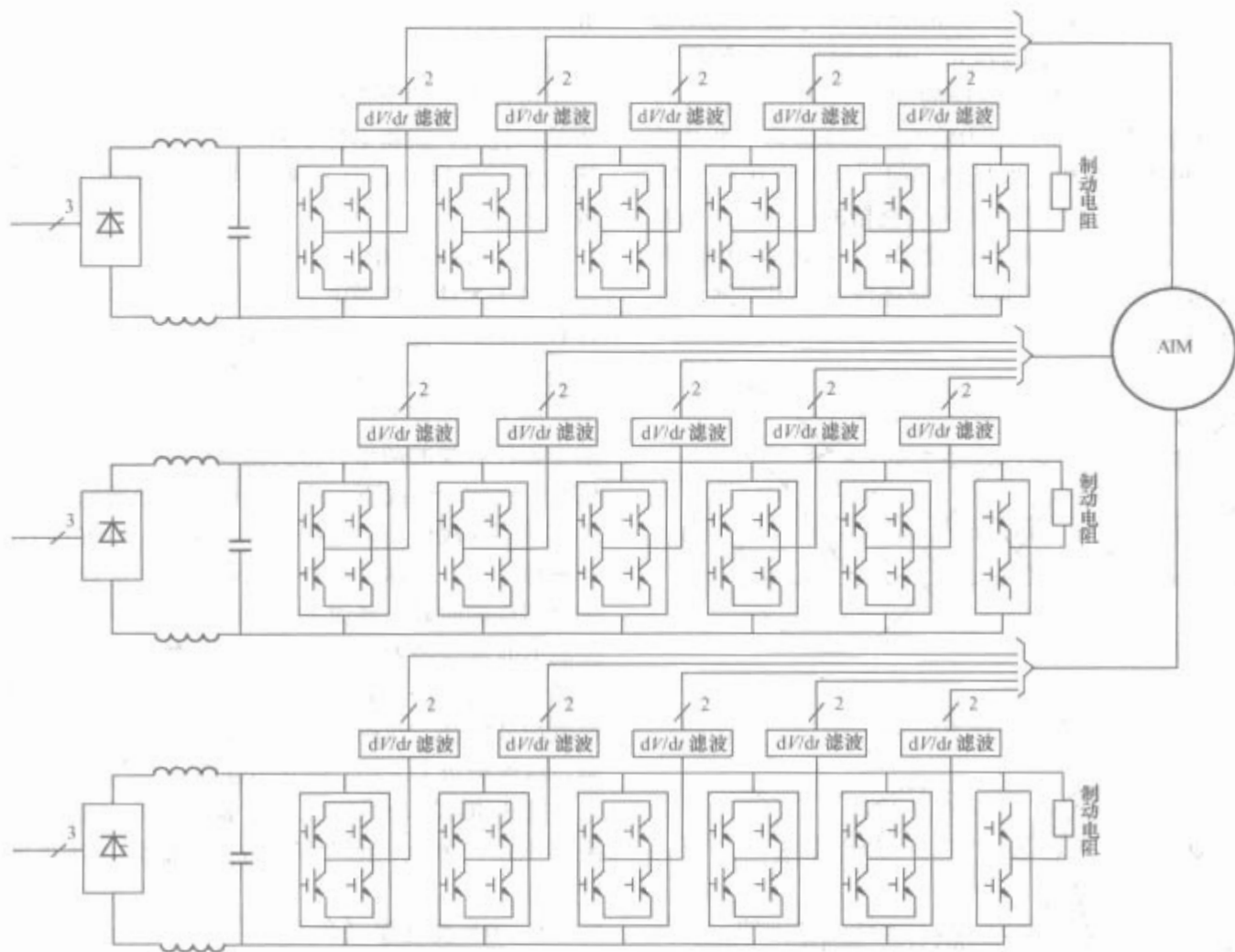


图 5.4-11 15 相 H 桥变流器

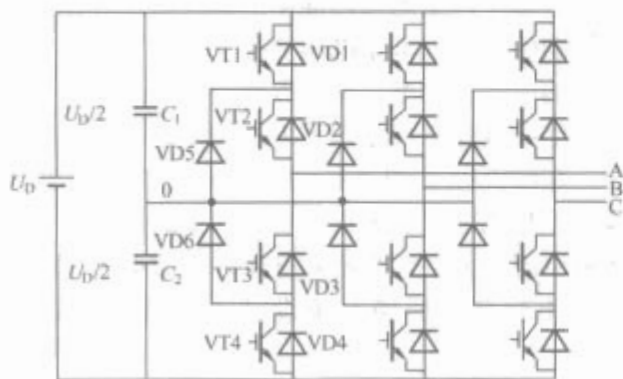


图 5.4-12 二极管钳位式三相三电平
逆变器拓扑图

电平逆变器，采用中性点钳位拓扑结构的 30MVA 的变流器已实现。

一种五电平变流器结构如图 5.4-13 所示。它使用 MOS 关断晶闸管（MTO）对多个中间电平之间的基准电压进行开关，然后经过基于 IGBT 的谐振开关作为 PWM 电压源输出，由于开关损耗和导通损耗均被大大减少，这种变流器拓扑结构可改善变流器效率。开关损耗的减少是因为 MTO 很

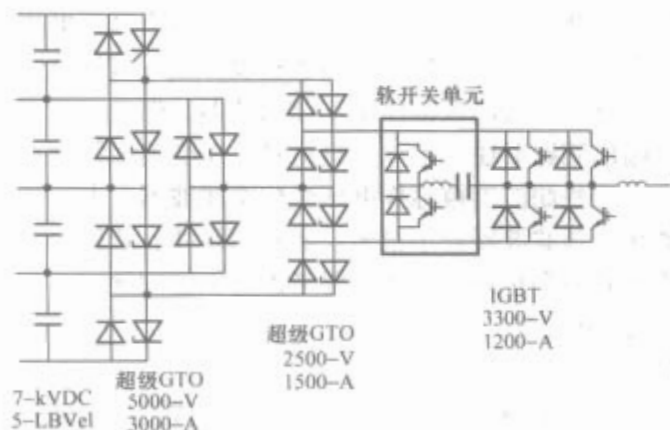


图 5.4-13 一种五电平逆变器拓扑图

少控制基本电压的开关，而且 IGBT 完成最后的脉宽调制时也采用谐振电路。导通损耗的减少主要是因为在这类拓扑结构中采用 MTO 代替了 IGBT，而 MTO 是基于晶闸管的电力电子器件，因此正向导通压降大大降低。

1.2.7 矩阵变流器

矩阵变流器的电路拓扑形式与其他电力变流器相比，矩阵变流器具有主电路拓扑结构简单和诸多理想特性。如：

- (1) 提供正弦的输出电压和产生正弦的输入电流。
- (2) 无中间直流环节，动态响应快。
- (3) 设计适当的调制算法可实现输出电压幅值、频率和输入功率因数的独立控制。
- (4) 功率因数角可在正负之间调节，可以不产生无功或对电网起到一定的无功补偿作用。
- (5) 采用不同的控制算法，同一矩阵变换器装置可分别实现整流器、逆变器、变流器、斩波器等的功能。因此，它还有“广义变换器”的别称。

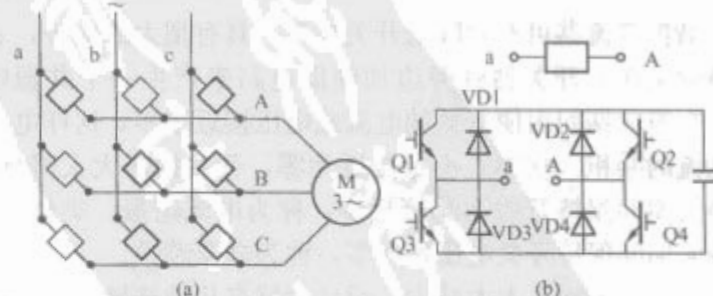


图 5.4-14 矩阵式变流器

(a) 拓扑结构；(b) 双向开关的基本构造

如图 5.4-14 所示，9 个双向开关器件像矩阵一样连接在一起。在固定的开关时间段内依次连接每个输入相（ V_A 、 V_B 、 V_C ）和每个输出相（ V_a 、 V_b 、 V_c ），这样电桥就可以输出理想的波形。为了使期望输出电压的产生不受三相输入

电压瞬时值的影响,输出的电压必须限制在低于输入电压包络线的范围之内。如图 5.4-15 所示,由于输入电压包络线的限制,输出电压限制在输入电压的 50% 以内。当输入的两相正向电压相等时,这个电压为输入电压峰值的一半(正向)。同样,当输入的两相负电压相等时,这个电压也为输入电压峰值的一半。上述特点使矩阵变换器的应用受到了很大的限制。图 5.4-16 为矩阵变换器改善后的电压包络(二)。虽然矩阵变换器在电力推进领域还没有应用实例,但它是很有潜力的结构形式。

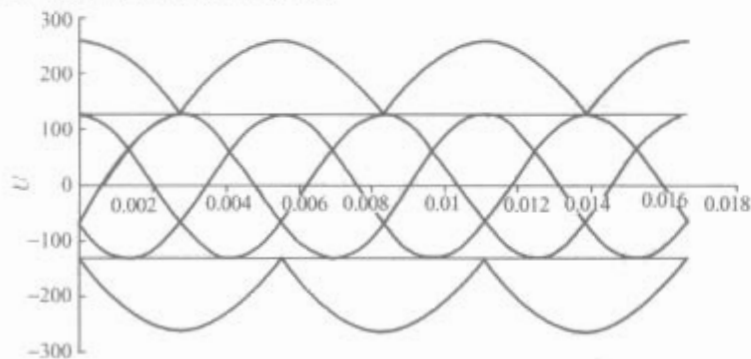


图 5.4-15 矩阵变换器电压包络(一)

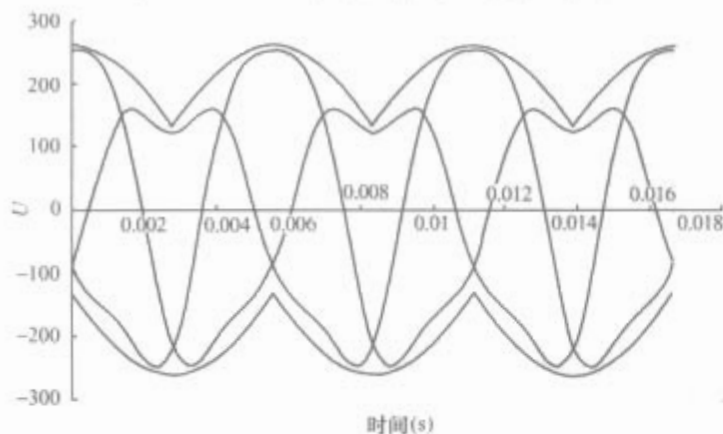


图 5.4-16 矩阵变换器电压包络(二)

1.3 推进变流器的相关问题与技术途径

1.3.1 开关频率和开关损耗

对船舶电力推进变流器功率器件而言,提高开关频率和降低开关损耗是一对矛盾。功率器件的开关频率越高,供给负载的电压和电流波形质量越好,这对降低振动噪声以及对降低变流器输出滤波要求有利,船舶电力推动系统设计者希望能使用开关的最高频率。但是,由于每个开关周期中都伴有能量的损耗,开关频率越高损耗越大。当前船舶电力电子变流器的开关频率限制值远远低于其理论能力,提高功率器件的开关频率同时降低开关损耗是目前变流器发展的目标之一。

谐振变流器可有效降低开关损耗,具有很大的优势,它的概念是在主开关器件旁边加辅助电路来产生一个共振电流,在换向期间内使开关的电流或电压接近于零,这样电压和电流的乘积(功率)也是接近为零,开关损耗大大降低。若换向期间保持开关电流接近零,称为电流谐振,类似地,若换向期间保持开关电压接近零,称为电压谐振。

一旦开关损耗大大减少,设计者就有几种选择:可以提高变流器的效率,可以提高变流器的开关频率,也可以提高变流器的输出电流(因此传输损耗会代替开关损耗),还可以将三者结合起来。但是,对于船舶推进用谐振变流器还存在一个问题:如前所述,船舶推进系统长时间处于部分负荷工况,因此变流器的开关损耗也会随之大幅度降低,但是谐振电路产生的附加损耗却和变流器满负荷工作时的损耗基本

相同。这样,在低负荷工况时采用谐振变流器,不仅不能降低损耗,反而会增加整体损耗。解决这个问题的办法是设计一个可以断开的谐振电路,当谐振电路引起的损耗大于它节省的损耗时,就将谐振电路断开,但是这种方法只能用于电流谐振变流器,而且这种谐振变流器的体积较大、造价较高。

1.3.2 功率器件串、并联

对于大功率船舶电力推进系统存在的问题是电力电子器件有时不足以提供所需的功率等级。而增加变流器容量的一个最直接的方法就是对功率器件进行串并联。在理想情况下,两个特性完全相同的器件串联或者并联后的容量是原来单个器件容量的两倍,由其构成的变流器的容量也会增加一倍。但在实际情况下,由于器件本身参数的分散性,一些器件不得不降额使用,这样使得串并联后变流器的总功率要小于理想情况,具体大小要根据器件的匹配程度而定。因此在选择器件的时候,要保证器件的参数差异尽可能小,同时在控制的时候要使器件的驱动信号尽量保持同步。另外,在精选器件的同时仍然需要解决串联时的电压均分以及并联时的电流均分问题。使用串联的 IGBT 时必须对温度进行严格控制,以保护每个 IGBT 的开关性能。

基于 IGBT 串并联技术在舰船上电力推进上得到应用,采用 IGBT 串联“H”桥结构变流器主电路如图 5.4-17 所示。

1.3.3 电压变化率(dV/dt)

变流器用于驱动推动电机,由变流器产生的 PWM 波形对电机绝缘性能的影响很大,电机的绕组绝缘必须能够承受正弦波调制过程中产生的边沿陡峭的脉冲电压冲击。由于对电机绝缘影响的主要因素是电压变化率,而 PWM 变流器可以产生极高的电压变化率,这个因素引起的绝缘能力的下降以及潜在的绝缘故障常常是超乎人们想象的,需要在设计时首先考虑。在欧洲及美国进行的紧凑式推进电机开发过程中,绝缘故障是几个开发失败项目最常见的原因。由于这种绝缘方面的原因对 PWM 变流器直流环节的电压也形成了限制,因此中压标准对船舶系统设计人员就显得比较有吸引力。

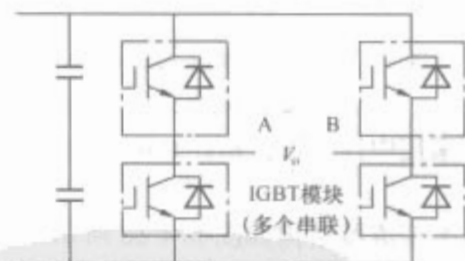


图 5.4-17 采用 IGBT 串联“H”桥结构变流器主电路

由于变流器输出端的电压变化率是电机绝缘能力下降的主要原因,所以许多变流器使用输出滤波器来降低电压的变化率。有时候,这些输出滤波器也被设计成可以消除主要的输出谐波分量,它们被称作是正弦滤波器。但是,更多的情况下,输出滤波器往往设计成只是将电压变化率限制在一定水平上,这些滤波器被称作电压变化率滤波器。电压变化率滤波器比正弦滤波器要小很多,实际的尺寸、费用、节省的全系统的效率都是系统设计时要考虑的关键问题。

1.3.4 保护技术

1.3.4.1 过电流保护

电力电子变换和控制系统运行不正常或发生故障时,可能会发生过电流,造成开关器件的永久性损坏。过电流在过

载和短路两种情况下发生。通常电力电子变换器系统均同时采用几种过电流保护措施以确保保护的可靠性和合理性。所选择的几种过电流保护措施应相互协调配合。通常选用电子保护作为延时最短但动作阈值最高的一级保护,当电流传感器检测到过电流值超过动作电流整定值时,电子保护电路输出过电流信号、封锁驱动信号、关断变换器中的开关器件、切断过电流故障。快速熔断器是电力电子变换器系统中常用的一种过电流保护措施。快速熔断器的熔断时间与过电流的大小有关(与发热量 I^2t 有关),快速熔断器对开关器件的保护有全保护和仅作短路保护两种保护类型,可由设计者选定。

桥式电路变换器中,一个特殊的短路潜在危险是上、下两个开关管直通。为避免这种直通,一个开关管开通信号的时间应滞后于另一个开关管关断信号。

1.3.4.2 过电压保护

电力推进变流器中可能发生的过电压有:

(1) 操作过电压。由电路开关分闸、合闸操作所引起的过电压。电路合闸接通电源的瞬间,高压电源电压通过降压变压器一次、二次绕组之间的分布电容直接传至二次电力电子变换器的开关器件。电路分闸断开变压器时,变压器一次励磁电流突然被切断所引起的过电压感应到二次侧,使电力电子变换器开关器件承受操作过电压。

(2) 换相过电压。与开关器件并联的二极管在导电结束时,不能立即恢复反向阻断能力,如果有反向电压作用,则会有较大的反向电流流过二极管使内部残存的载流子恢复,当其恢复了阻断能力时,反向电流急剧减小,这时线路中杂散电感感应很大的反电动势,这个反电动势与电源电压相加作用在与二极管并联的开关器件上,可能使开关器件过压而损坏。

(3) 关断过电压。开关器件关断时,其电流迅速减小,而在电感上产生很高的感应电压加在正在关断的开关器件上,可能使其过电压损坏。

1.3.5 变流器冷却

船舶推进电力电子器件通以电流后,要消耗大量的功率,这部分耗散功率转变成热量则使管芯发热、结温升高,管芯发热后,就要通过周围环境散热。冷却方式主要为液体冷却和沸腾冷却。

通常船舶电力推进变流器采用水冷散热器。水冷散热器的冷却效率极高,其对流换热系数等于空气自然换流系数的150倍以上。由于普通水在高压下发生电离而成为导体,会给设备和人身带来很大的威胁,因此内循环水应采用去离子水,在船上装备一套去离子水设备。

液体冷却的另一种方式为油冷,油冷散热器的散热效率在水冷散热器与风冷散热器之间,冷却介质多用变压器油。

沸腾冷却是将冷却媒质(如氟利昂)放在密闭容器中,通过媒质的相变来进行冷却的技术。这种冷却方式具有极高的冷却效率,其高于油冷和水冷若干倍,比风冷高十多倍,而且沸腾冷却装置的体积比同容量油冷和自冷装置要小得多。

1.3.6 推进电机回能与吸收

如前面章节所述的螺旋桨反转特性,从推进电机正转速到反转过程中,螺旋桨产生负转矩,推进电动机运行在发电机状态,向变流器供电,这是电力推进中的回能现象。回能吸收对于电力推进变流装置的设计是十分重要的,通常需要设置专门的动态制动电阻和控制器,如图5.4-11所示中采用了制动电阻的方法来及时吸收回能,防止巨大的回能影响上游电力系统的稳定性。

1.3.7 谐波畸变与抑制

变流器的供电电压和负荷电流的非基频分量被称为谐波,由此产生的畸变被称为谐波畸变。畸变的电流和电源电压波形可能导致:①加速绝缘材料的老化,连接于网络的设备,如发电机、电动机、变压器、电缆等,由于谐波电流而增加的功率损耗可能会引起绝缘过热和老化,减少设备的运行寿命;②电子设备的过载,增加了设计上由正弦电源电压供电的电子设备的负载电流,设备可能产生过热或失灵;③畸变波形可能产生过大的电磁干扰,导致电子设备误动作。

谐波畸变水平在电力推进系统中尤为显著,因为主要负载通常是由变流器驱动的推进电机。因此,有必要预测谐波畸变,评估其影响,并且采用正确的手段来控制电压畸变,以满足标准和规范对船舶网络谐波畸变的要求,使装置的在整个使用寿命内没有功能缺陷。因而,对变流器谐波性能的设计是关键问题。

1.3.8 电磁兼容

船舶电力推进变流器要达到电磁兼容性的要求,它的电磁辐射既不能影响其他设备的运行,也不能使变流器受到其他设备产生的电磁辐射的影响。只有按照综合考虑电磁兼容设计方案,才能实现电磁兼容,即使在极端的电磁干扰情况下,也可确保变流器正常运行。

电磁兼容性问题在标准规范中有相应的规定,变流器这种特殊设备也应该满足相关的技术标准规范。但是,大尺寸的电力推进变流器的电磁兼容性设计在许多方面取决于设计者的经验。大量电磁干扰检测设备对这个设计工程也起到了很大作用。

由推进电机和变流器构成的电力推进系统不论为哪一种形式,电磁信号都主要由以下几种互相影响的因素决定:①额定推进功率;②变流器到推进电机的电流;③电缆种类;④电缆长度;⑤变流器与电机之间的阻抗匹配特性;⑥变流器输出滤波器特性;⑦推进电机的设计和较小漏磁的能力;⑧推进电机和变流器的相数;⑨变流器的调速策略;⑩接地方法。

变流器输出滤波器一般可以降低电磁干扰,增强电磁兼容性。其作用主要是:①减小PWM的电压变化率(dV/dt);②减小传输线效应;③减小电机接地电流、准方波电压/电流、定子齿槽效应引起的电磁干扰。输出滤波器通常有以下三种形式。

(1) 正弦波滤波器。可以改善电机的输入波形,这样就可以使用现有的电机作为变频调速电动机使用,也可以使电机安装在距离变流器较远的地方(避免传输线效应——电缆传输准方波式PWM波形时具有的特性)。尽管PWM变流器的 dV/dt 比较大,但采用正弦波滤波器后可以采用工业标准电机,不必过多地考虑其绝缘问题。标准的三相鼠笼式异步电机和带有正弦波输出滤波器的PWM变流器采用已有商用的标准配置。

(2) dU/dt 滤波器。为了降低PWM变流器较大的 dU/dt 和电磁干扰的影响,新设计的电机一般都采用 dU/dt 滤波器,如果不加 dU/dt 滤波器,电机的绝缘和电磁兼容性就会恶化,变频调速电动机必须降额使用。 dU/dt 滤波器也可用来减小共模电压引起的接地电流。

(3) 有源滤波器。有源滤波器可以用来调节各种变流器与电机之间的波形,也可用于调节中压母线的波形。

1.3.9 变流器的特征噪声信号与抑制

在船舶电力推进中,针对不同形式的变流器的特征噪声信号,应采取相应的抑制技术。下面简要介绍几种常用的变

流器特征噪声信号及抑制技术的适用性。

1.3.9.1 循环变流器的特征噪声与抑制

循环变流器采用的是调相控制原理,对供电波形进行调制得到输出波形。由于晶闸管桥电流大幅度变化,以及电机的脉动转矩,使变流器成为较大的振动噪声源。6脉冲和12脉冲的定子齿槽效应对电磁泄漏也有影响。对于电力推进中的循环变流器,转速变化使输出频率发生变化,供电谐波频率也会相应变化,要滤除这些与负载相关的谐波很困难,推进电网上的时变谐波是重要的电磁发射源,所以一般把舰船的日用电网发电机组和被“污染”的推进电网隔离开。

1.3.9.2 同步变流器的特征噪声与抑制

由于同步变流器采用负载换向,当变频调速电机的转速低于10%时电机的转矩脉动将大幅度增加,这是因为低速运行时,电机的反向电动势不足以使晶闸管变流器自然换向。在低速工况,通过供电侧晶闸管桥的适当开关来影响逆变侧晶闸管桥,实现强迫换向,造成中间直流电压的较大波动,从而增大了脉动转矩。这种脉动转矩和推进电机一起产生了舰船绝大部分的噪声信号。有源滤波器技术在减少转矩脉动和电压电流畸变率方面取得了很好的效果。

1.3.9.3 PWM变流器的特征噪声与抑制

为了降低特征噪声信号,同时获得较高的效费比,需要对一些参数进行优化。PWM变频调速系统的减振降噪技术主要有:①控制策略;②输出滤波器特性;③减小共模电压引起的环流;④接地方式;⑤从变流器到电动机的电缆设计。采用上述的任何一种特征信号抑制技术,都需要根据全船的特征信号对各参数进行优化调整。

1.4 船舶电力推进变流器的选择

考虑到推进功率、可维护性及经济性等各方面因素,目前船舶电力推进的主流是采用交流电机推进,因此对应的变流器为交—交循环变流器或者交—直—交变流器。循环变流器主要用于速度极低扭矩极高的场合,例如破冰船等,另外这种变流器的功率密度较低,输出谐波大,导致较大的振动和噪声。同步变流器和PWM变流器是目前的主流变频调速技术。同步变流器主要用于同步电动机变频调速控制,其技术发展已经十分成熟,由于它主要采用晶闸管作为主开关器件,因此在电压、功率等级和经济性方面具有优势,所以很多采用电力推进的大型民船,如油轮和客轮等,都采用这种结构的变流器,它的主要缺点是功率密度不高,同样存在噪声和振动大的问题。

因此对于隐身性、机动性要求较高的舰船来说,同步变流器可能无法满足需要。主要选择性能更加优越的PWM变流器,它在功率密度、输出谐波、控制性能等方面比其他几种类型的变流器具有更多的优点,另外,它的控制对象也更加灵活,可以是异步电机、同步电机或者是永磁电机,这为电力推进的研发提供了更多的选择。

2 船舶直流推进调速系统

直流电动机具有良好的调速性能,常常被用于船舶电力推进系统中,作为推进电机使用。船舶直流推进调速系统是以直流推进电机作为控制对象的调速系统。直流推进电机的转速和各变量之间的关系可用下式表示

$$n = (U_a - I_a R_a) / (k_e \Phi) \quad (5.4-1)$$

式中: n 为电机转速; U_a 为电机电枢输入直流电压; I_a 为电机电枢电流; R_a 为电机电枢电路的电阻; Φ 为电机励磁主磁通; k_e 为由电机结构决定的电动势常数。

由式(5.4-1)可以看出,直流推进电机调速主要有三种方式,一是改变电枢输入电压实现调速,二是改变电机励磁磁通大小来实现调速,三是调压与调磁的配合方法。对于永磁有刷电机,励磁是永磁体产生,则只能采用改变电枢输入电压实现调速。

电枢回路中串联电阻或励磁回路中串联电阻的方法出现在早期的调速系统中,该方法电阻损耗较大,系统效率不高,目前很少使用或只作为应急使用。对于交流电源供电时,可采用可控整流方式来实现调速功能。而对于直流电源供电时,则需要采用斩波器来实现调速功能,斩波器是一种DC/DC电源变换装置。

随着电力电子技术的发展,全控型开关器件在大功率、易驱动、高频率三个方面取得了飞跃进步,越来越多的斩波器采用了IGBT绝缘门双极性晶体管替代传统的SCR晶闸管,使其体积、质量大幅下降。即便是在交流电源供电时,也越来越多地采用全桥不控整流加IGBT斩波器来实现推进电机调速。

用于电枢调压调速的斩波器可称为电枢斩波器,而用于励磁绕组调压调速的斩波器可称为励磁斩波器。励磁斩波器工作电流小,但调速范围有限,并且其快速响应能力不如电枢斩波器调速。

由于直流电动机具有电刷和机械换向器,存在着自身的缺点。如结构复杂;体积大、质量重、价格高、维护困难,使用场所会受到限制,在中、低速时效率较低等。为了提高电力推进安静性,电力推进向低转速、高转矩方向发展,而直流电动机因功率极限值有限难以实现,因此许多国家正在开发或已经开发了永磁电力推进系统。

永磁电力推进系统是以永磁电机为基础的电力推进系统。在永磁电机(PM)中,转子的直流励磁绕组被永磁体取代,这样做的优点是消除了励磁损耗,提高电机的输出功率密度,并使电机转子具有更坚固的结构和更低的转动惯量。永磁电机按磁链方向可分为径向磁通永磁电机、轴向磁通永磁电机和横向磁通永磁电机,其中径向磁通永磁电机应用最为广泛。永磁电机按其反电动势波形形状可分为正弦永磁电机和梯形波永磁电机。正弦永磁电机和梯形波永磁电机都可以被控制作为“直流无刷电机(BLDM)”运行,然而,梯形波永磁电机与直流电机的特性更接近,并且比正弦永磁电机具有更高的功率密度。本节中所描述的无刷直流永磁电机推进调速系统是以梯形波永磁电机为控制对象的调速系统。

2.1 直流电机推进调速系统

直流推进电机的供电电源可以由直流发电机供电,交流发电机整流供电,也可通过蓄电池组供电。目前国内使用的船舶直流电机推进调速系统单机主要参数范围如表5.4-1所示。

表 5.4-1 船舶直流电机推进调速系统单机主要参数范围

输入直流电压 U (V)	电机轴功率 P (kW)	最高转速 n (r/min)	调速范围
100~1000	20~5000	200~500	10:1

2.1.1 直流电机推进调速类型

2.1.1.1 蓄电池组—直流电动机电力推进

这种电力推进方式主要用于水下航行的船舶推进,如潜

艇、深潜器等。其优点是：供电电源不依赖空气、无旋转机械，推进系统安静性及隐蔽性好。缺点是：蓄电池质量大，蓄电池和电机要很好的维护。

在蓄电池组—直流电动机电力推进调速方式中，采用了蓄电池组串并联调速、双电枢串并联调速、改变电机励磁磁通大小来实现调速、改变电枢输入电压实现调速等方法。也可以将这些方法配合使用，以实现推进系统高效率、高可靠性和较大的调速区要求。

如在常规潜艇的电力推进系统中，直流推进电机设计为一台双电枢推进电机或两台推进电机，蓄电池组设置为两组蓄电池，调速控制中设置了电枢斩波器、励磁斩波器和励磁电阻，如图 5.4-18 所示。图中 1DCZ、2DCZ 为蓄电池组； R_1 、 R_2 为固定励磁电阻；1LCTJ、2LCTJ 为励磁斩波器；1DSZB 为电枢斩波器；M1、M2 为直流推进电机的两个电枢。3QFCB、4QFCB 为蓄电池组的串并联开关，3QDS、4QDS 为电枢的串并联开关。

在高速区，由蓄电池串联给双电枢并联的推进电机供电，通过励磁斩波器来实现高速区的连续调速。

在中速区，则采用蓄电池串联给双电枢串联的推进电机供电，同样通过励磁斩波器来实现连续调速。

在低速区，采用蓄电池并联给双电枢串联的推进电机供电，由励磁斩波器来实现连续调速。

在经济航行区，由一组蓄电池或两组蓄电池并联供电，通过电枢斩波器调节电机单电枢输入电压实现调速，励磁斩波器调节固定推进电机对应电枢的励磁电流不变。

固定励磁电阻是在励磁调节器出现故障时，代替其作用。

2.1.1.2 直流发电机-直流电动机电力推进

直流发电机和直流电动机的主电路之间的连接可以是串联，也可以是并联。大多数情况下，直流发电机与电动机之间采用了串联方式，并且直流发电机可以由多台串联组成。串联方式与并联方式相比，具有下列优点：

1) 推进电动机在其调速范围内，不要求驱动发电机的原动机转速恒定或具有复杂的调节装置。可以最大限度地利用每台发电机的功率。

2) 可以将低电压的直流发电机串联，给高压直流电动机供电，在不增加电流的情况下，提高电力推进输出功率。

3) 当负载不平衡或负载突变时，整个系统仍能较稳定的工作。即使串联的各直流发电机外特性有差别，也不会对

系统的稳定工作有很大影响。

直流发电机-直流电动机电力推进，依据所采用的控制方式或发电机的不同，可以得到不同的调速系统。通常主要有恒功率调速系统和恒流调速系统。

(1) 恒功率调速系统。简单的直流发电机—直流电动机电力推进原理图如图 5.4-19(a) 所示。发电机和电动机都采用他励电机。它们的励磁可以采用直流电网供电，也可以采用交流电网供电。采用直流电网供电时，用励磁斩波器或励磁电阻调节励磁电流的大小实现调速；在采用交流电网供电时，可以先将交流电用二极管整流为直流电后使用，也可以用晶闸管直接可控整流调节励磁电流大小实现调速。

恒功率调速系统就是使电动机输出的转速及转矩，在适应螺旋桨的工作特性范围内，保持其积为常数。这就要控制发电机的输出电压与其输出电流之乘积为常数。这样就使原动机的输出功率，在适当的调速范围内近似保持不变，原动机就具有最大的利用率及效率。

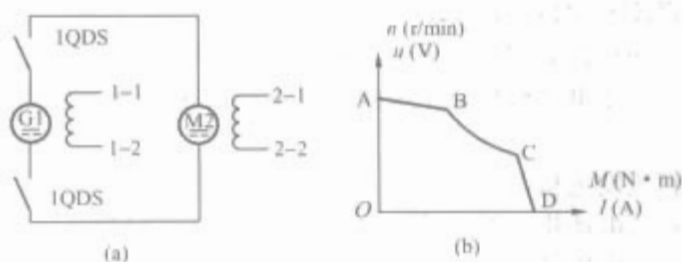


图 5.4-19 恒功率调速系统
(a) 原理图；(b) 恒功率曲线

船舶航行时，螺旋桨可能发生堵转（如在冰区航行），也可能露出水面或损坏脱落。如果不对这种情况加以调节，就会发生电动机严重过载（电流）或飞车事故。所以，恒功率调速只要求在螺旋桨正常工作的某个区段，如图 5.4-19 (b) 中的 BC 段。超过这个范围就应加以限制，如图 5.4-19 (b) 中的 AB、CD 段。

我国的 985I 型航标工作船和 991II 型布缆船都采用了这种电力推进系统。日本的“富士号”南极观察船和原苏联的“列宁号”原子破冰船也采用了这种恒功率调速电力推进方式。

(2) 恒流调速系统。恒流调速系统如图 5.4-20 所示，直流发电机与直流电动机的主电路串联在一起。这个电路中，通过控制发电机的励磁电流使得主电路的电流保持不变，通过调节直流电动机的励磁电流实现调速。

采用恒流调速控制方式的优点是：

1) 可以分别控制各直流电动机投入运行，而且由于所加的励磁大小不同，电动机的输出功率不同。使原动机的功率得到合理的分配。

2) 恒定的主电路电流使得发电机、电动机不会发生电流过载。同时，起动电动机，或者反转都可以较迅速的进行。

缺点是只能在一定的负载下运行，当发生轻载或失载时，会产生电动机飞车事故。为了防止这种情况，最好在电动机上加速度反馈环节。

恒流调速系统在我国制造

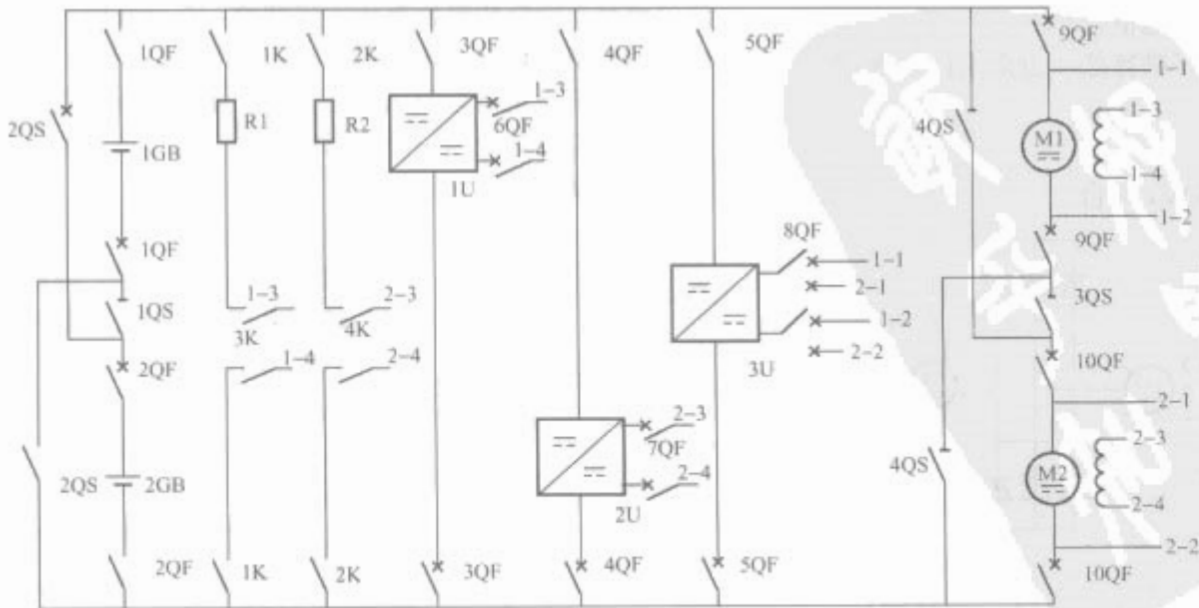


图 5.4-18 蓄电池组—直流电动机电力推进调速系统

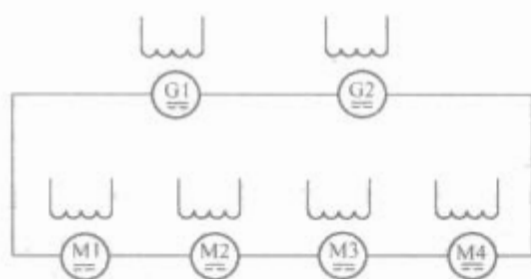


图 5.4-20 恒流调速系统

的轮渡船及耙吸式挖泥船上都有应用。此外, 912IV 型消磁船也采用了恒流调速系统。两台柴油机驱动两台直流发电机, 与驱动两个螺旋桨的两台电动机构成串联主电路。主电路中的恒流控制采用了晶闸管整流技术。在停泊, 进行消磁作业, 又可以将主推进发电机的能量用于消磁, 有利于综合利用原动机。该船主要数据如下:

原动机, 柴油机, 1600kW, 750r/min, 2 台。

直流发电机, 1380kW, 600V, 750r/min, 2 台。

直流电动机, 1250kW, 580V, 500r/min, 2 台。

法国建造的“凡尔康”号布缆船, 采用四台直流发电机与两台直流电动机构成主电路串联恒流调速系统。主要装置数据为:

直流发电机, 1300kW, 750r/min, 4 台。

直流电动机, 2200kW, 2 台。

(3) 交流发电机—直流电动机电力推进。交流发电机与直流发电机相比, 具有体积小、质量轻、可靠性高等特点, 在 20 世纪 80 年代得到了广泛的应用。交流发电机通常采用电励磁的同步发电机。同步发电机发出的电能, 经过电源变换器, 供给直流推进电动机, 这就构成了交流发电机—直流电动机电力推进。如图 5.4-21 所示。

图 5.4-21(a) 中, 电源变换器采用了二极管不控整流, 同步发电机的直流励磁电流由串联在其绕组中的电阻调节, 或由发电机励磁调节器调节。当改变同步发电机的励磁电流时, 同步发电机的输出电压会发生变化, 整流后加在直流电动机上的电压也会随之改变。这样所得到的调速范围, 可以与直流发电机—直流电动机推进相媲美。并且, 交流同步发电机的功率、转速都可以比直流发电机大的多。世界上有许多国家的大功率电力推进船舶采用了这种方式。

美国建造的 12 万 t 油船装有双螺旋桨推进器。每轴上装有:

燃气轮机, 29 400kW, 2 台。

交流发电机, 34 000kVA, 4160V, 2 台。

直流电动机, 3×9800kW, 三电枢, 2 台。

前苏联建造的“北极号”原子破冰船, 也采用这种推进方式。其主要数据为:

汽轮机, 27 500kW, 2 台。

交流发电机, 9000kVA, 780V, 6 台。

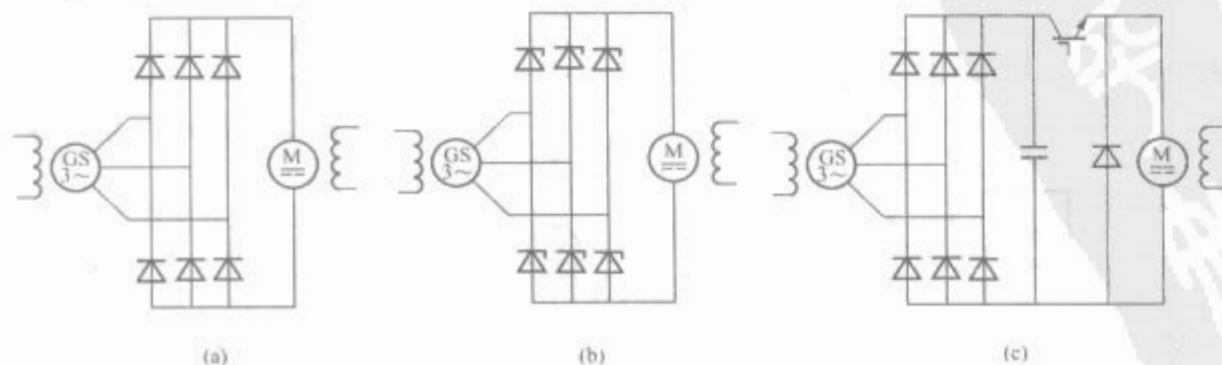


图 5.4-21 交流发电机—直流电动机电力推进

(a) 二极管不控整流; (b) 晶闸管可控整流; (c) 二极管不控整流加斩波器调速

直流电动机, 2×8800kW, 双电枢, 3 台。

电源变换器若采用晶闸管可控整流, 如图 5.4-21(b) 所示, 就可以保持同步发电机电压不变, 通过改变晶闸管的导通角, 调节直流输出电压, 实现直流电动机调速的目的。同步发电机所发出的电能可以供给船舶电网, 有利于节能。

西门子公司建造的 6000t “德意志”号火车轮渡, 采用了这种电力推进。其主要数据为:

柴油机, 1800kW, 1500r/min, 9 台。

交流发电机, 2180kVA, 1000V, 1500r/min, 50Hz, 9 台。

直流电动机, 每台双电枢, 2×3500kW, 1200V, 195r/min, 2 台。

英国 GEC 公司为澳大利亚建造的滚装船也采用这种推进方式, 装有:

燃气轮机, 8800kW, 1 台。

交流发电机, 10 000kVA, 3300V, 50Hz, 1 台。

直流电动机, 3900kW, 985V, 200 r/min, 2 台。

图 5.4-21c 中, 电源变换器采用了二极管不控整流加斩波器调速, 与可控整流相比, 斩波器可以采用高频开关器件设计, 开关频率比整流频率高很多, 电动机电流脉动小, 转矩波动小, 对电网产生的谐波干扰小。目前, 这种工作方式正逐步取代图 5.4-21b 所示的方式。

在图 5.4-21b、c 中的电励磁同步发电机可以用永磁发电机代替。图 5.4-21b、c 中的电励磁直流电动机也可以用永磁有刷直流电动机代替, 但电源变换器要改为可逆整流电路、可逆斩波器才能实现电动机的正反转调速。

2.1.2 直流电机推进调速装置

在直流电机推进调速系统中, 常常需要对电机电枢或励磁电流进行调节, 这就需要用到 DC/DC (直流/直流) 电源变换装置和 AC/DC (交流/直流) 整流变换装置。

DC/DC 电源变换装置包括斩波降压电路、升压变换电路和升降压变换电路三种方式。其中斩波降压电路调速最为常见。

可控整流电路在有关资料中介绍的比较详细, 由于本章篇幅有限, 不再介绍。

采用现代电力电子器件设计的斩波调速装置, 从 20 世纪 80 年代在我国开始推广使用, 先后有多种型号的斩波器装置已经用于船舶电力推进中。目前, 采用 IGBT 器件研制出的模块化斩波器, 应用于船舶上的单元容量达到了输入电压 1000V、输出电流 1200A。

2.1.2.1 直流电机推进电枢斩波调速

通过调节直流电机电枢电压实现调速, 在交流电源供电时可采用可控整流调速系统。但在直流电源供电或二极管整流供电时, 则需采用斩波调速系统。为了便于分析电路, 我们将直流推进电机等效为一个电枢电感、一个电枢内电阻和一个直流反电动势串联电路。

图 5.4-22(a) 是电枢斩波调速的基本电路, 电路的输出电压 u_0 和输出电流 i_0 只能为正值, 是一种不可逆调速电路, 电机反转只能通过改变电机励磁电流方向来实现。电路中的 Q 采用 IGBT 器件, IGBT 门极控制信号采用了 PWM 调制信号, IGBT 的保护电路给予省略。VD1 为续流二极管。

通过 PWM 信号的控制, 可以获得图 5.4-22(b)、图 5.4-22(c) 两种可能的电压电流波形。图 5.4-22(b) 的负载电流 i_0 是不连续的, 在图 5.4-22(c) 中的负载电流 i_0 是连续的。

图 5.4-22(a) 所示电路, 只能控制直流推进电机在一个方向转动, 且没有制动能力, 是 1 象限斩波电路。在许多直流推进电机调速控制中都要求能实现正、反转控制, 并要求有快速制动能力, 这就要求主电路采用 4 象限斩波电路, 如图 5.4-23 所示。

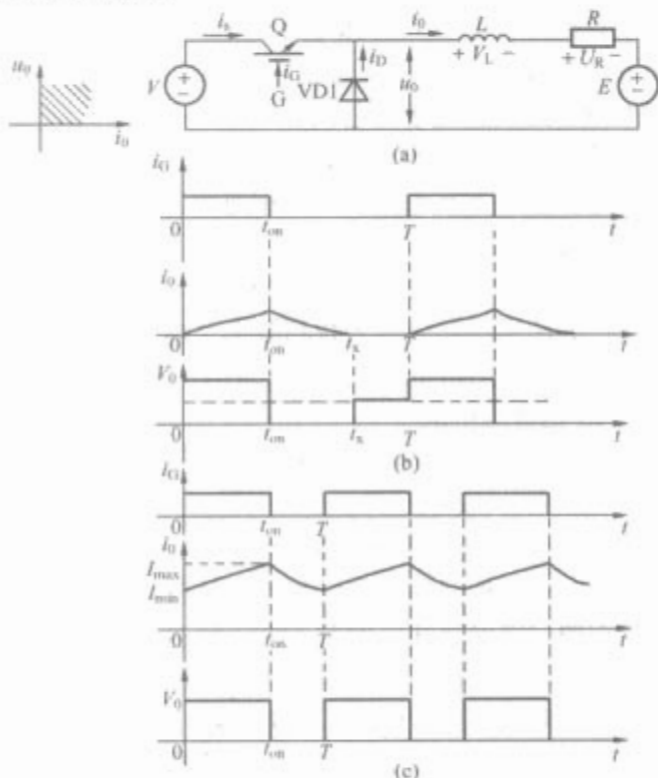


图 5.4-22 电枢斩波调速的基本电路及其电压、电流波形

(a) 电枢斩波调速基本电路; (b)、(c) 电压、电流波形

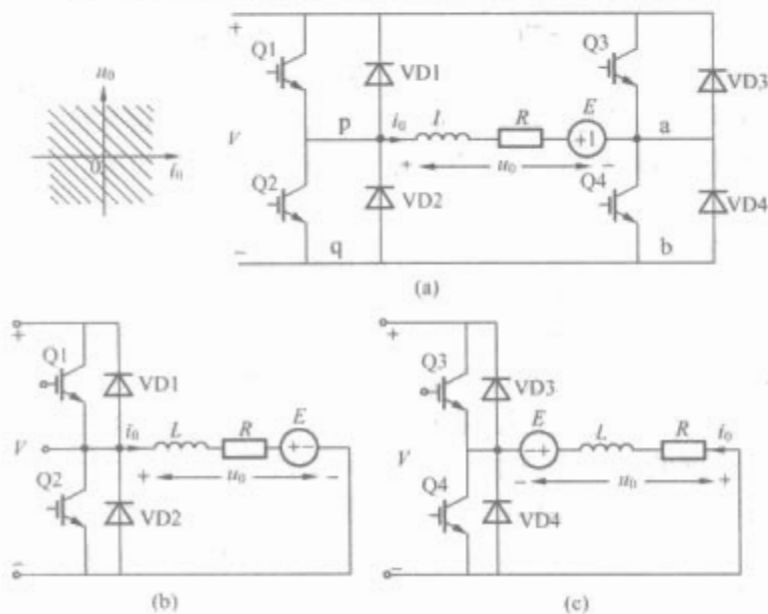


图 5.4-23 4 象限斩波电路

(a) 4 象限斩波电路原理图; (b) 1、2 象限等效电路;
(c) 3、4 象限等效电路

图 5.4-23(a) 中, Q_4 连续导通, 则不允许 Q_3 再导通, 否则将发生短路。此时, a、b 两点可视为短接, 图 5.4-23(a) 电路可等效为图 5.4-23(b) 电路, 此时, 斩波电路工作在 1、2 象限。如果图 5.4-23(a) 中 Q_2 连续导通, Q_1 不允许导通, 则图 5.4-23(a) 电路可等效为图 5.4-23(c) 电路, 此时, 斩波电路工作在 3、4 象限。因此, 4 象限斩波电路可根据不同的控制实现 4 个象限的运行。当斩波器工作在 1、3 象限时, 电机工作在电动机状态。如果在 1 象限工作时, 定义电机为正转, 则在 3 象限时为反转。当斩波器工作在 2、4 象限时电机向电

源回馈能量, 电机工作在发电机状态。且在 2 象限时为正转发电机回馈; 在 4 象限时为反转发电机回馈。

2.1.2.2 直流电机推进励磁斩波调速

通过调节直流电机励磁电流大小实现调速, 在交流电源供电时可采用可控整流电路给电机励磁绕组供电。但在直流电源供电或二极管整流供电时, 则需采用励磁斩波调速系统。可逆励磁斩波电路如图 5.4-24 所示。其工作原理与 4 象限斩波电路相同, 也采用 H 桥斩波电路, 但其输出电压、电流工作区主要在第 1、3 象限。励磁斩波器比电枢斩波器容量要小的多, 因此, 直流电机推进调速系统在高速区采用励磁斩波器工作, 而在低速区采用电枢斩波器工作可以获得优化的系统调速性能和很高的经济效益。

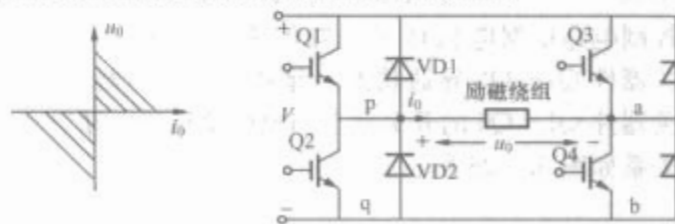


图 5.4-24 可逆励磁斩波器调速电路

2.2 无刷直流永磁电机推进调速系统

在无刷直流永磁电机推进调速系统中, 逆变器作为电机绕组供电的变换装置, 可以采用电压型和电流型两种电路设计。控制器对电机转子位置进行检测, 并根据转子位置控制逆变器的工作状态和输出电压、电流大小, 实现调速控制。位置传感器有霍尔传感器、光电传感器和旋转变压器等类型, 用于对电机转子位置进行检测, 确定转子磁链 Ψ 的位置, 实现自控频率调压调速运行。

无刷直流永磁电机一般可近似看作直流电机, 只有下面几点不同:

- 1) 与直流电机不同, 磁场旋转而电枢静止不动 (常被成为反结构的直流电机)。
- 2) 不像直流电机有一个机械式换向器, 取而代之的是由位置传感器控制的逆变器。
- 3) 磁链 Ψ 不是静止的, 磁链以同步速度旋转。安装在转子上的位置传感器给出磁链位置。如果是电流型逆变器, 相电流 I_a 控制在与磁链 Ψ 成一定角度的位置上。

无刷直流永磁电机的特性如下:

- 1) 电子换向器取代机械换向器和电刷, 克服了直流电机维护保养、换向打火、速度和额定功率限制。可以在苛刻条件下运行。
- 2) 由于换向是自控的, 没有传统同步电机的稳定性和振荡问题。
- 3) 瞬态响应与直流电机类似。
- 4) 相电流 I_a 和磁链 Ψ 之间的相角可以按需要进行调节。 Ψ 不再像直流电机那样只固定在 $\pi/2$ 的角度。
- 5) 采用高能磁体, 可以使转子惯量更小, 对要求快速响应的传动系统是个很大的优点。

2.2.1 无刷直流永磁电机推进调速类型

无刷直流永磁电机推进调速系统主要采用电压型逆变器和电流型逆变器两种类型控制。

2.2.1.1 电压型逆变器控制的无刷直流永磁电机推进调速系统

电压型逆变器控制的三相无刷直流永磁电机如图 5.4-25 所示。三相无刷直流永磁电机可以用一个等效电路来表示, 其中的每一相由定子电阻 R 、等效电感 L , 以及一个梯形波

反电动势串联而成。

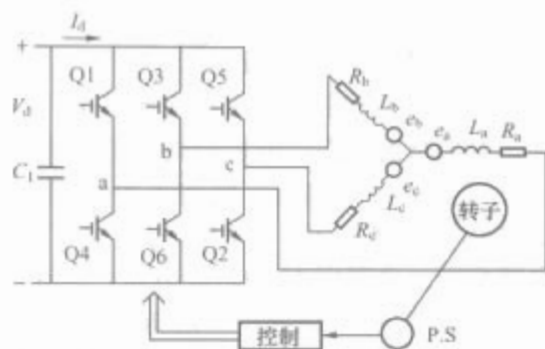


图 5.4-25 无刷直流永磁电机推进调速原理图

在图 5.4-25 中，功率开关器件 Q1~Q6 组成三相逆变电路，控制电路依据电机转子位置传感器 P.S 信号，控制功率开关器件 Q1~Q6 导通状态，起到电子换向器的作用。功率开关器件 Q1~Q6 的开关状态与电机绕组反电动势之间的对应关系如图 5.4-26 所示。

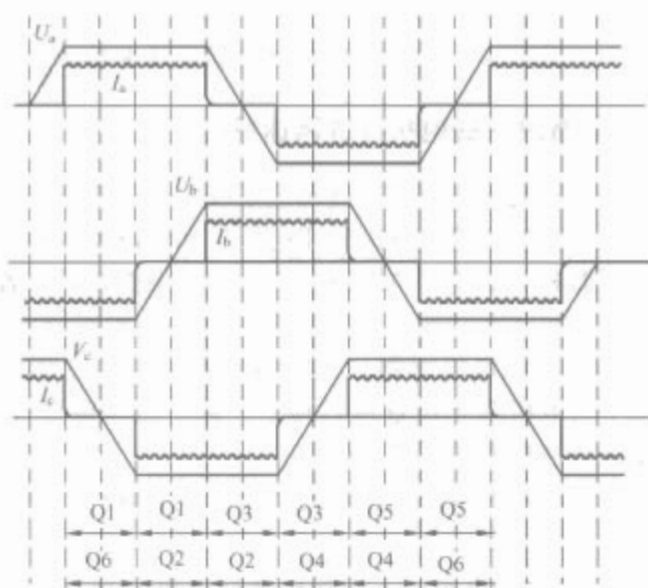


图 5.4-26 逆变器工作时电机定子相电压和相电流波形图

在图 5.4-26 中，逆变器按 120° 导电方式工作，即在任一瞬间 6 个开关器件中只有 2 个同时导电。也就是说，如果忽略换流过程，各相电流都将是幅值为 I_d 、宽度为 120° 的矩形波，6 个器件 Q1、Q2、Q3、Q4、Q5、Q6、Q1、Q2……依次导通，电机的三个绕组 a、b、c 中流过的电流如图 5.4-26 所示。

三个输入的相电流的基波构成一个旋转磁场，其旋转速度由逆变器的基波开关频率决定，旋转方向由逆变器的开关顺序确定，如果 6 个开关的导通顺序是 Q1、Q2、Q3、Q4、Q5、Q6 时为正序，则 6 个开关的导通顺序改为 Q6、Q5、Q4、Q3、Q2、Q1 时，旋转磁场方向改变。为了调整各相绕组电流大小，逆变器工作时，通常上半桥 Q1、Q3、Q5 开关器件在导通期间一直导通，而下半桥开关器件 Q2、Q4、Q6 在导通期间工作在 PWM 脉冲宽度调制状态。通过调整 Q2、Q4、Q6 PWM 的导通比来控制各相绕组电流大小，导通比越大输出给绕组的电流也越大。

定子旋转磁场与转子磁场相互作用产生电磁转矩 T_e ，带动转子随定子旋转磁场一道同步旋转。改变直流电流 I_d 的大小，可以改变电磁转矩的大小；改变逆变器开关的触发顺序，可以改变电机的旋转方向；改变逆变器的基波开关频率，可以改变无刷直流永磁电机定子绕组电流频率。但图 5.4-25 所示的调速系统中，逆变器 6 个开关器件的通断信

号，不是独立给定的，而是由电机转子瞬时位置确定的。6 个开关器件需要 6 个宽度 120°，相差 60° 的控制信号，如图 5.4-26 所示。故称这种控制系统为自控频率调压调速系统，其定子频率自动跟踪转子的旋转速度。

在运行中，只要增加 Q2、Q4、Q6 开关器件 PWM 的导通比，主电路中的电动势平衡关系就会迫使 I_d 增大，电磁转矩 T_e 加大，电机随之加速，因而通过转子位置检测器以后使定子频率增大，定子电动势加大，重新建立新的电动势平衡关系，系统就在较高的速度和定子频率下稳定运行。因此，调节 Q2、Q4、Q6 开关器件 PWM 的导通比，可以十分简便地调节无刷直流永磁电机的转速。

考虑到单个三相逆变器容量的限制和能够完善解决永磁电机低速转矩脉动，常常采用多个三相逆变器控制多个独立三相的无刷直流永磁电机。

也有用多个 H 桥式逆变器控制多相独立绕组的无刷直流永磁电机。如法国热蒙公司为智利海军“蝎子”级潜艇制造的 3300kW 永磁电力推进系统，就采用了 25 个 H 桥式逆变器给两套 13 相绕组供电。

2.2.1.2 电流型逆变器控制的无刷直流永磁电机推进调速系统

图 5.4-25 给出了电压型逆变器驱动的无刷直流永磁电机推进系统，电压型逆变器的主电路比较简单，体积小、质量轻、控制方便，很受欢迎。但对于电压型逆变器驱动的无刷直流永磁电机，一方面，为了提高机械特性硬度，加快换相过程，我们希望减小绕组电感，相电感越小越好；另一方面，绕组的电感对电流起到平波作用，电感越大，高频脉动电流越小，高频涡流损耗降低，永磁体高频感应损耗降低，系统效率提高，可靠性提高，因而又希望增加绕组电感。因此，在无刷直流永磁电机推进系统设计中，要特别注意控制与电机的匹配，使系统的运行工作点得到优化。

对于较大功率的无刷直流永磁电机推进系统，如果要求其调速范围宽，低速稳定性好，振动噪声低，可靠性高，也可采用电流型逆变器驱动的无刷直流永磁电机推进系统。电流型逆变器驱动的无刷直流永磁电机推进系统如图 5.4-27 所示。

在图 5.4-27 中，脉冲宽度调制和逆变功能分开控制。VT1 工作在 PWM 状态，常采用 IGBT 器件，VD1 为续流二极管， L_1 为平波电感。VT1、VD1 和 L_1 组成斩波恒流源输出，与后面的逆变桥形成电流型逆变器。在平波电感 L_1 的电感值远大于电机相电感 L_a 、 L_b 、 L_c 时，电路输出到电机绕组的电流为方波电流。对采用交流电源供电时，VT1、VD1 构成的斩波器降压单元可以用可控整流桥代替其功能。

图 5.4-27 中， e_a 、 e_b 、 e_c 为三相无刷直流永磁电机相反电动势， R_a 、 R_b 、 R_c 为相绕组等效电阻。VS1~VS6 为主晶闸管，组成三相桥式逆变电路。VS7、VS8 为强迫换相辅

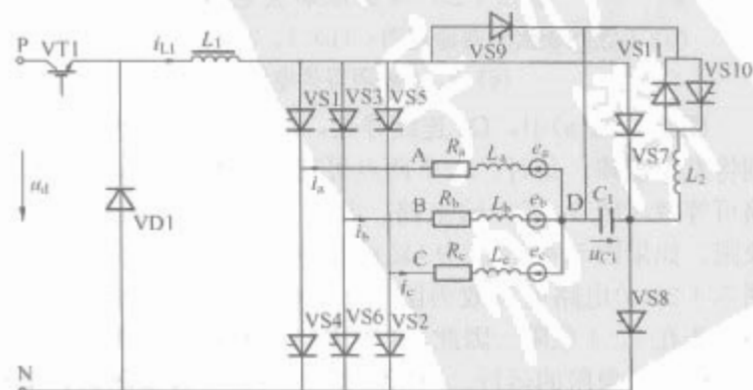


图 5.4-27 电流型逆变器驱动的无刷直流永磁电机推进系统主电路图

助晶闸管，VS9 为换相电容 C_1 的预充电辅助晶闸管，VS10、VS11 与 L_2 组成对电容 C_1 电压极性调整电路，使换相电容 C_1 的电压极性与换相的晶闸管要求一致。

与电压型逆变器相比，电流型逆变器换相过程电流上升快，换相时间短，绕组电流平滑，高频谐波热效应低，系统可靠性高，不存在击穿故障，低速稳定性好，振动噪声低。缺点是主电路较为复杂，要求电机绕组电感量小，不能空载运行。如果电机绕组电感量大，可能会在逆变器开关器件上产生数倍反电动势的电压尖刺，并增加换相时间。

为了进一步提高推进系统输出功率，降低电机振动，无刷直流永磁推进电机也常常设计为多相结构，即电机定子绕组由多个三相绕组构成。每个三相绕组由相同的电流型逆变器供电，组成一个通道。多通道的主电路如图 5.4-28 所示，各个通道之间是并联关系，独立控制，可以在运行过程中根据需要切除某一通道运行，也可投入某一通道运行。

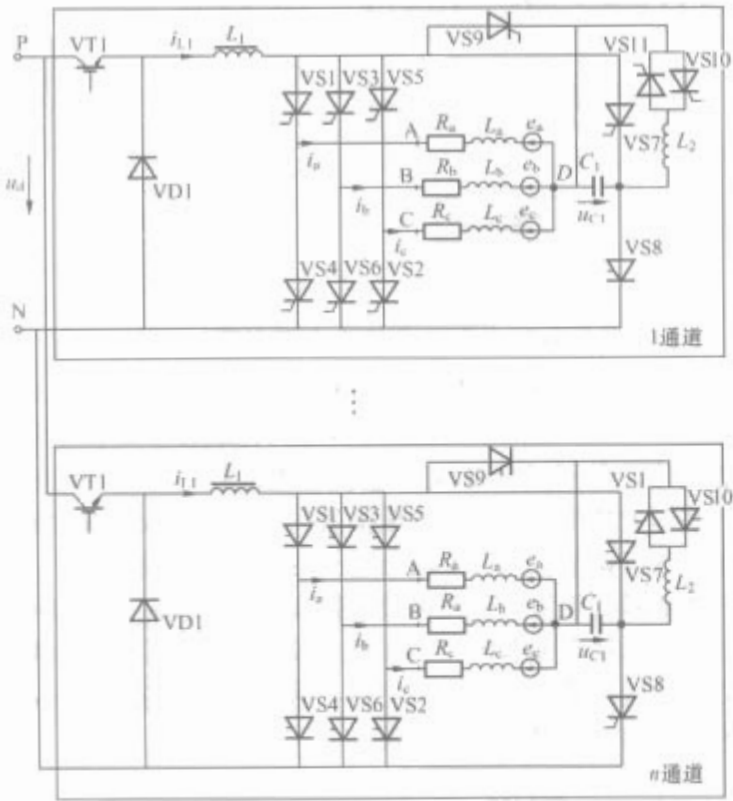


图 5.4-28 多通道电流型逆变器驱动无刷直流永磁电机推进系统主电路图

俄罗斯研制的 4100kW 永磁电力推进采用这种控制方式。

图 5.4-28 是多通道电流型逆变器驱动无刷直流永磁电机推进系统，通道之间采用并联结构。与之相对应，图 5.4-29 是多重化电流型逆变器驱动无刷直流永磁电机推进系统。在多重化结构中，电流型逆变器是串联的。电机仍然是多相无刷直流永磁电机，如果串联电流型逆变器个数为 n ，则电机相反电动势幅值只有多通道结构相反电动势的 $1/n$ 。

采用多重化结构，可以使电机相绕组电感量降低，使逆变器容易换相。同时，降低了转矩脉动和高频谐波热效应。缺点是主电路进一步复杂。

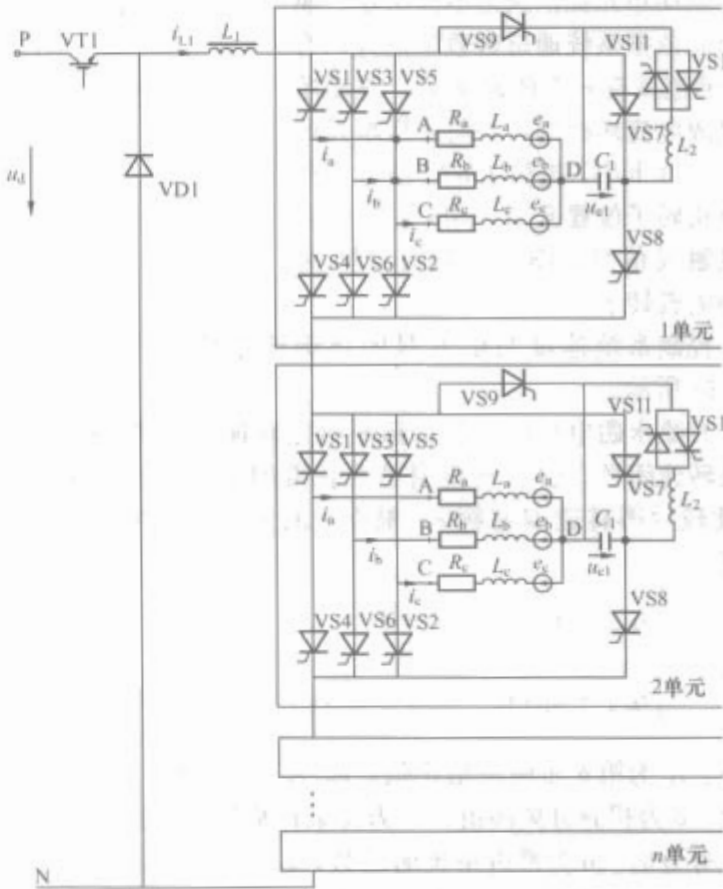


图 5.4-29 多重化电流型逆变器驱动无刷直流永磁电机推进系统

2.2.2 无刷直流永磁电机推进调速的控制系统

采用不同的无刷直流永磁电机推进调速方式，其控制系统有不同的设计要求。对应图 5.4-28 所示的多相无刷直流永磁电机推进调速系统，其控制系统构成框图如图 5.4-30 所示。

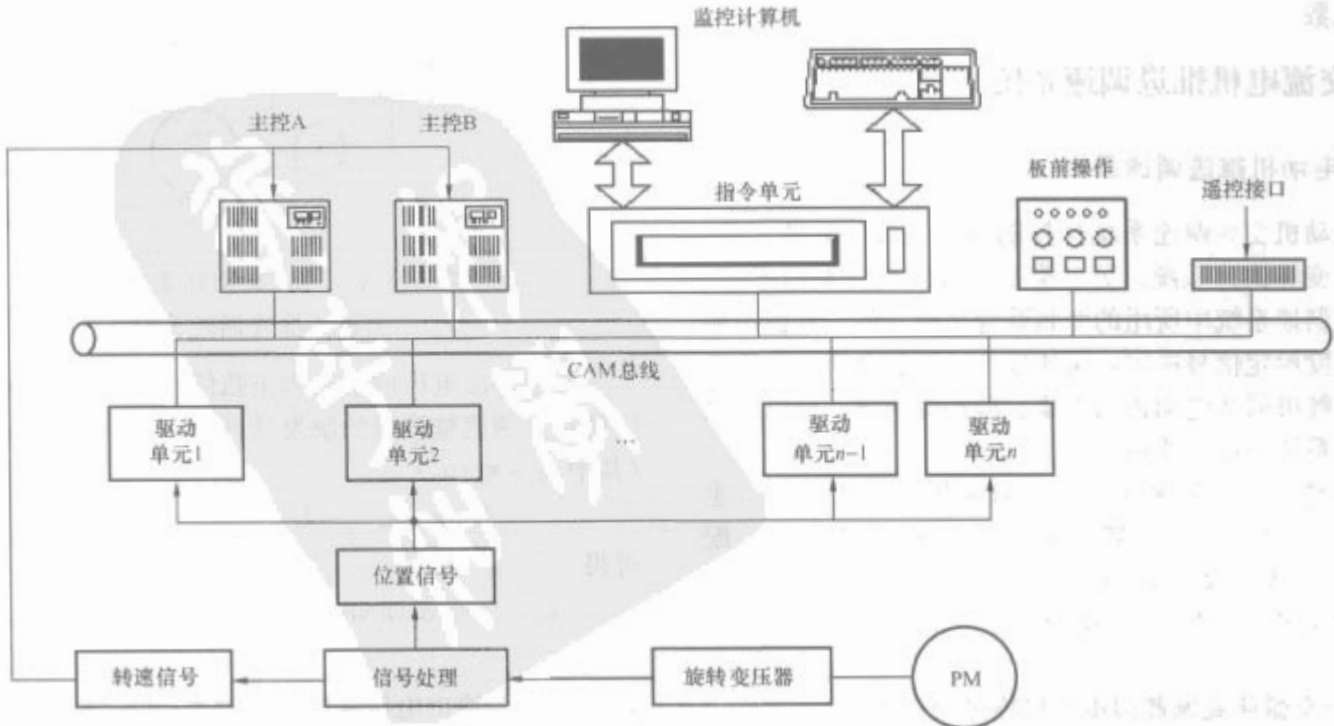


图 5.4-30 无刷直流永磁电机推进调速的控制系统构成框图

图 5.4-30 中所示的控制系统监控计算机由专业技术人员操作,对系统运行情况进行监控,并通过它修改控制软件程序。操作人员通过板前操作,或通过遥控接口实现集中控制,实现推进系统起动、停机、调速和正反转转换。主控 A、主控 B 为实时控制计算机,并互为备用,主控计算机完成转速信号采集、速度环控制,并向各驱动单元提供通道电流给定。驱动单元依据系统通道数数量设置,有 n 个通道就有 n 个驱动单元,驱动单元完成电流环控制,并向降压单元的开关器件 IGBT 提供 PWM 信号,根据电机转子位置向 S1~S11 主晶闸管提供触发信号。图 5.4-30 中 PM 为永磁电机转子。

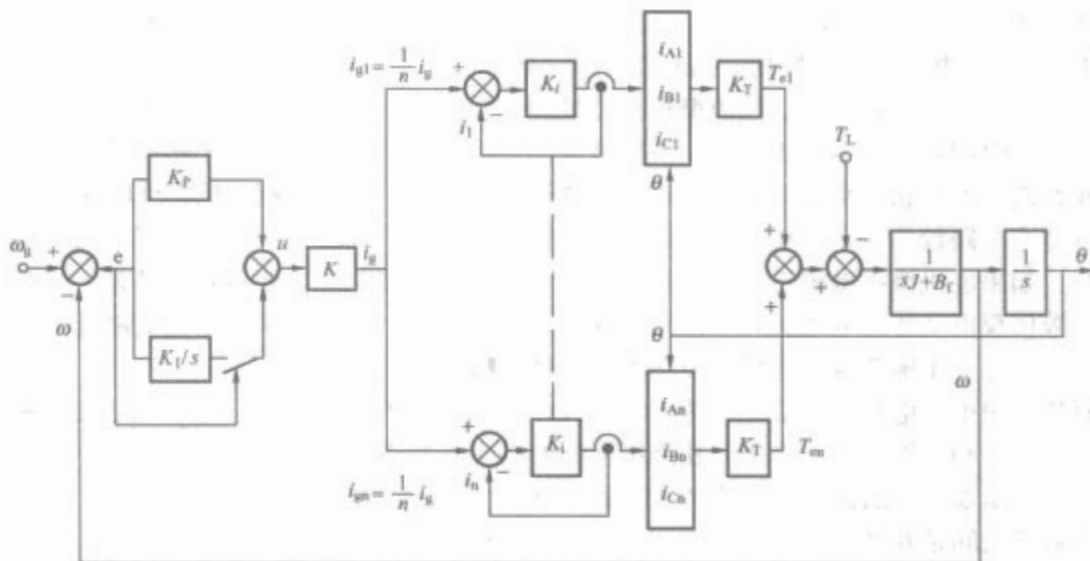


图 5.4-31 控制系统速度与电流双闭环调速系统静态框图

控制系统速度与电流双闭环调速系统静态框图如图 5.4-31 所示。

直流永磁电机的控制目标是给定转速 ω_g , 控制系统外环是转速闭环。由位置检测单元获得的电机反馈转速 ω 与 ω_g 比较后得转速偏差额 e , 根据 e 的大小, 采用以下调节方案

$$i_k = \begin{cases} i_{k-1} + k_p e & |e| > \delta \\ i_{k-1} + k_p \left(e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_1} e_k \right) & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (5.4-2)$$

式中: i_k 为第 k 步电流给定值; k_p 为比例系数; T_1 为积分常数; δ 为积分分离阈值; T 为位采样周期。电流给定值均分 n 等分后 (n 为推进系统通道数) $i_{g1} = i_{g2} = i_{g3} = i_{g4} = i_{g5} = i_{g6} = i_k/n$, 分别送到给定驱动单元作为电流的控制目标。

电流闭环作为控制系统的内闭环。电流给定值 i_g 与电流反馈值 i_t 比较, 偏差经放大器 K_i 后产生 PWM 信号, 控制主回路中开关期间 T_1 的通断, 使通道输出电流 i_{L1} 跟踪电流给定值 i_g 。

图 5.4-31 中 T_{e1}, \dots, T_{en} 为第 1 通道、……、第 n 通道产生的电磁转矩, T_L 为负载转矩, θ 为电机转子位置角度, s 为 Laplace 算子, J 为推进系统转动惯量, B_f 为轴系转矩摩擦系数。

3 船舶交流电机推进调速系统

3.1 同步电动机推进调速系统

同步电动机变频调速系统从控制方式上可分为两大类:一类是他控变频调速系统;另一类是自控式变频调速系统。他控式变频调速系统所用的变频装置是独立的,其输出频率直接由速度给定信号决定,属速度开环控制系统。由于这种系统没有解决同步电动机的失步、震荡等问题,所以在电力推进调速系统中很少使用。

同步电动机的变频调速系统一般采用自控式运行。主回路由同步电动机、变流器及转子位置检测器组成,配上控制装置,就构成了自控式同步电动机调速系统,如 5.4-32 所示,图中 MS 是同步电动机, PS 是转子磁极位置检测器。

3.1.1 交—交循环变流器同步电机推进调速系统

交—交循环变流器同步电机推进调速系统由交—交循环

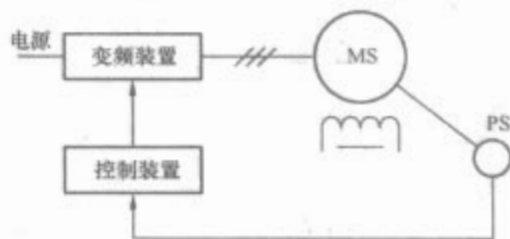


图 5.4-32 自控式同步电动机调速系统

变流器、同步电动机、励磁电源和控制装置四部分组成,其结构见图 5.4-33。其中交—交变流器及其控制技术是该系统的核心主体。交—交变流器可以直接将电源较高频率的电压变为频率可变的电压输出,电压幅值的大小通过改变晶闸管的触发角进行调节。为了使输出电压的谐波减至最小,正、负两组整流器的触发延迟角可按余弦规律进行控制。输出电压是由输入电压上截取的片段组成。交—交变流器完成变频过程必须经过换流过程和换组过程,前者是利用电网换向,后者利用输出电流过零信号实现。

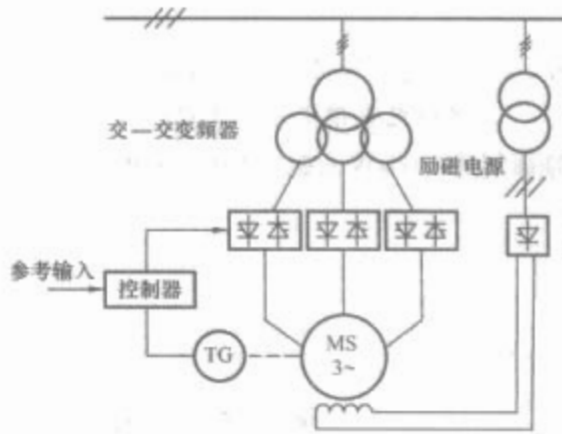


图 5.4-33 交—交循环变流器同步电机推进调速系统

假设输出电压的基波为正弦信号: $u_1 = U_{1m} \sin \omega_1 t$, 则可以使正负两组整流器的触发延迟角 α_p 和 α_n 按下列规律变化 (其中 $\alpha_p = \pi - \alpha_n$)

$$U_{d0} \cos \alpha_p = -U_{d0} \cos \alpha_n = U_{1m} \sin \omega_1 t \quad (5.4-3)$$

可得

$$\alpha_p = \arccos(k \sin \omega_1 t) \quad 0 < \alpha_p < \pi; \quad 0 < k < 1 \quad (5.4-4)$$

式中: ω_1 为输出电压基波的角频率; U_{1m} 为输出电压基波的幅值; U_{d0} 为正、负组整流器的理想空载直流电压; k 为调

$$u_q = r i_q + L_q p i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \quad (5.4-13)$$

$$T_{em} = p_m [\psi_f i_s \cos \beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) i_s^2 \sin 2\beta] \quad (5.4-14)$$

可见，其形式与三相电机完全一样，控制结构也一样。

该系统为转速、转子位置和电流等多闭环系统，转速和转子位置反馈分别来自测速发电机 GS 和转子位置检测器 PS，电流反馈可以通过一般的霍尔传感器得到。整个系统由多相永磁同步电动机 (PMSM)、逆变器、转子位置传感器以及相应的控制装置组成。从图 5.4-36 中可以看到，给定参考转速 n^* 与反馈转速的差值经速度调节器控制后可到直流电流参考量 i_d^* 、 i_q^* ，直流量经过坐标变换模块转换成 n 相交流参考信号，它与反馈回来的定子电流相比较获得滞环比较器的控制信号，从而最终得到逆变器各个开关的触发信号。

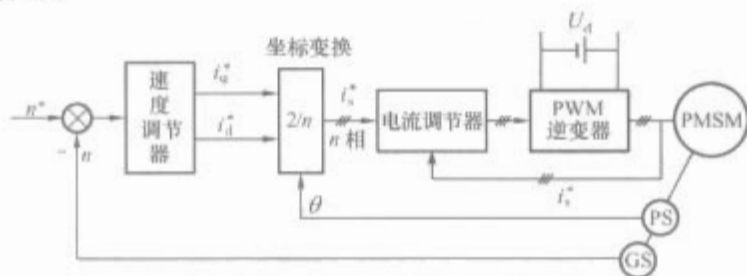


图 5.4-36 多相永磁同步电动机的矢量控制系统简图

3.2 异步电机推进调速系统

3.2.1 异步电机转速闭环转差频率推进调速控制系统

转速闭环转差频率控制属于一种标量控制方式，即仅仅对电机变量的幅值进行控制，并且忽略电机中的耦合效应。例如，通过控制电压便可控制磁链、通过控制频率或者转差率便可控制主转矩。但磁链和转矩又各自是频率和电压的函数。标量控制与矢量控制不同，后者的变量幅值和相位都被控制。标量控制的传动性能差一些，但是实现起来容易。

转速闭环转差频率控制一般要求保持电机的压频比不变，即 $U/f = \text{常数}$ ，在忽略定子电阻的情况下，这样做可以保持磁链 ($\psi_s = U_s / \omega_e$) 为常数。这种控制方式的控制框图如图 5.4-37 所示。

其中速度环误差通过比例积分 (PI) 控制器和限幅器后得到转差频率给定值 ω_{sl}^* 。该转差率给定值与速度反馈信号 ω_r 相加产生频率指令值 ω_e^* ，再通过 V/F 函数发生器产生电压指令 V_s^* ，该函数发生器含有低频定子压降补偿。由于在恒定磁链下的转差率与输出转矩成正比，因此可认为该方案在速度环内存在一个转矩开环控制。在阶跃速度给定下，电机在转差率限幅值下自由加速，该转差率限幅值对应于定子电流或者转矩的限幅值。最终电机进入稳态运行，此时的转差率由稳态时的负载转矩决定。如果速度给定值 ω_r^* 阶跃减小，则电机进入再生或者能耗制动模式，并以一定的负转差 $-\omega_{sl}^*$ 进行减速。

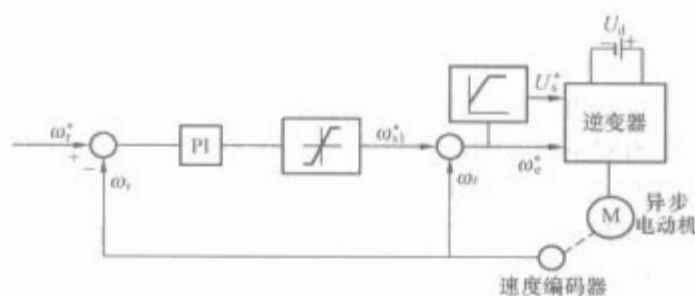


图 5.4-37 异步电机的转速闭环转差频率控制

3.2.2 基于矢量控制的异步电机推进调速控制系统

推进异步电机转子磁场定向矢量闭环控制系统的原理框图如图 5.4-38 所示。

在 5.4-36 的矢量控制系统中，最重要的环节是转矩电流和励磁电流的解耦控制以及转子磁链的观测，这两个环节都采用闭环控制。转子磁链观测器的输入信号是反馈的定子电流经 2/3 变换及 MT 旋转变换得到的 MT 定子电流和转子转速，经过 MT 电流观测模型后得到转子磁链的幅值和相位，相位信号用于旋转变换及其逆变换，而转子磁链幅值用于计算定子转矩电流和励磁电流。转矩电流 i_{T1}^* 由转矩方程计算得到，其中参考转矩由转速闭环经 PI 调解器得到。励磁电流 i_{M1}^* 由磁链方程计算得到，其中转子磁链由给定磁链与观测磁链的差值经 PI 调解器得到。M、T 轴两个电流分量经 PI 调解器得到 M、T 轴的两个参考电压，在经旋转变换得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的两个参考电压 $u_{\alpha1}^*$ 、 $u_{\beta1}^*$ ，该电压作为空间矢量 PWM 控制的参考电压矢量，经空间矢量模块后得到逆变器的控制信号。

另外，给定转子磁链采用弱磁控制算法，当电机转速在额定转速以下时，给定转子磁链 ψ_r^* 保持不变，电机以恒转矩规律运行，保证输出最大的电磁转矩。当电机转速超过额定转速以后，为了防止定子反电动势过高，采用弱磁控制算法，即适当减小转子给定磁链 ψ_r^* ，电机以恒功率规律运行，保证电机输出最大的功率。

3.2.3 异步电机推进调速的直接转矩控制技术

异步电动机直接转矩控制系统的控制框图如图 5.4-39 所示。

与矢量控制不同，直接转矩控制不需要进行解耦，因此不需要进行旋转坐标变换。框图中的坐标变换模块采用的是 $\alpha\beta$ 坐标系下的 3/2 变换。磁链观测器观测的是定子磁链幅值和相位，其中磁链幅值用于磁链滞环控制，以保持定子磁链恒定，磁链相位用于判断电压矢量所处的扇区。磁链观测器一般采用电压模型，即

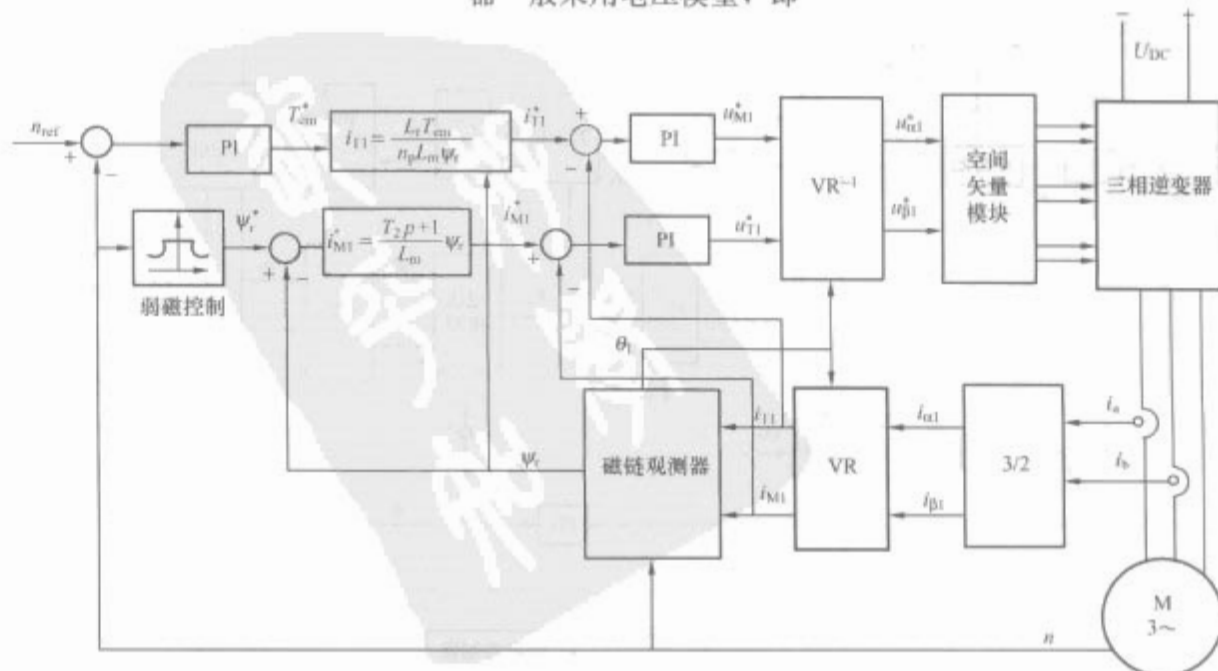


图 5.4-38 磁场定向矢量闭环控制系统原理框图

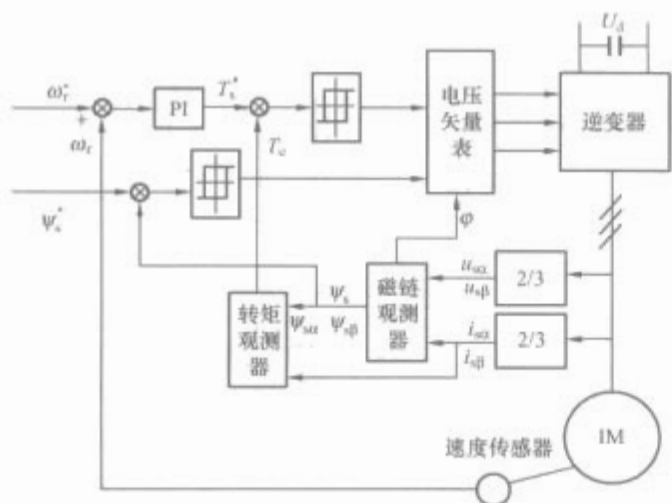


图 5.4-39 直接转矩控制系统框图

$$\psi_{sa} = \int (u_{sa} - i_{sa} R_s) dt$$
$$\psi_{sb} = \int (u_{sb} - i_{sb} R_s) dt$$
(5.4-15)

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{sa}^2 + \psi_{sb}^2}$$
(5.4-16)

$$\varphi = \arctan \frac{\psi_{sb}}{\psi_{sa}}$$
(5.4-17)

转矩观测器用于估算电磁转矩的大小，采用的也是 $\alpha\beta$ 坐标系下的模型

$$T_e = n_p (\psi_{sa} i_{sb} - \psi_{sb} i_{sa})$$
(5.4-18)

框图中的转矩、磁链控制器都是通过滞环比较器来实现。其结构如图 5.4-40 所示。

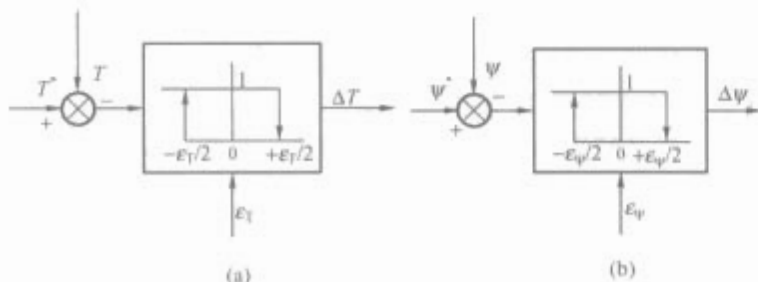


图 5.4-40 转矩控制器和磁链控制器结构图

(a) 转矩控制器；(b) 磁链控制器

对转矩控制，计算转矩给定值与转矩实际值之差 ΔT

$$\Delta T = T^* - T$$
(5.4-19)

转矩给定值由速度调节器的输出经 PI 调节得出，转矩实际值则由转矩观测器得出。设置滞环宽度 ϵ_T ，则转矩控制信号 TQ 由 ΔT 决定，即

$$TQ = \begin{cases} 0 & \Delta T \leq -\epsilon_T/2 \\ 1 & \Delta T \geq \epsilon_T/2 \\ \text{不变} & |\Delta T| < \epsilon_T/2 \end{cases}$$
(5.4-20)

$TQ=0$ ，要求选用电压空间矢量使转矩减小； $TQ=1$ ，要求选用电压空间矢量使转矩增大； TQ 不变，则选用电压空间矢量使转矩不变。

对磁链控制的原则与转矩控制类似，即

$$\psi Q = \begin{cases} 0 & \Delta \psi \leq -\epsilon_\psi/2 \\ 1 & \Delta \psi \geq \epsilon_\psi/2 \\ \text{不变} & |\Delta \psi| < \epsilon_\psi/2 \end{cases}$$
(5.4-21)

$\psi Q=0$ ，要求选用电压空间矢量使磁链幅值减小； $\psi Q=1$ ，要求选用电压空间矢量使磁链幅值增大； ψQ 不变，则选用电压空间矢量使磁链幅值不变。

在一个周期的 6 个扇区之内，根据转矩和磁链情况所选择的电压矢量如表 5.4-2 所示。

表 5.4-2 电压矢量选择表

磁链滞环输出	转矩滞环输出	扇区 1	扇区 2	扇区 3	扇区 4	扇区 5	扇区 6
$\psi Q = -1$	$TQ = 1$	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
	$TQ = 0$	u_7	u_0	u_7	u_0	u_7	u_0
$\psi Q = 0$	$TQ = 1$	u_6	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5
	$TQ = 0$	u_0	u_7	u_0	u_7	u_0	u_7
$\psi Q = 1$	$TQ = 1$	u_5	u_6	u_1	u_2	u_3	u_4
	$TQ = 0$	u_7	u_0	u_7	u_0	u_7	u_0

3.2.4 多相异步电机推进调速系统

(1) 多相异步电机结构形式与调速控制特点。同多相同步电动机一样，多相异步电机也具有多种结构形式，本节以双“Y”移 30° 异步电机为例对多相异步电机的调速控制系统进行分析。其主电路拓扑结构见图 5.4-41。

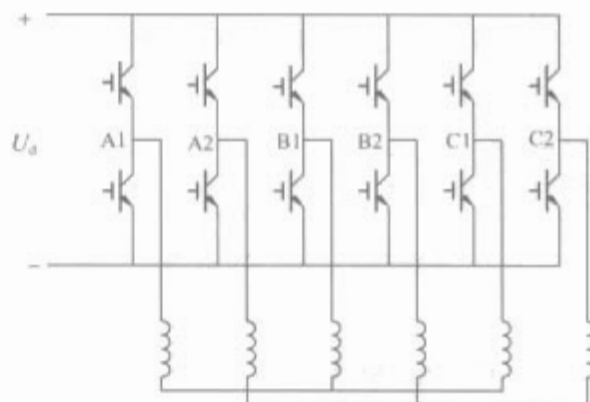


图 5.4-41 双“Y”移 30° 异步电机调速系统主电路拓扑结构

多相异步电机的控制在原理上可以采用同永磁同步电动机相同的控制方法，即把多绕组电机通过一个变换等效为一个两绕组电机，然后采用同三相电机类似的控制方法。但是多相电机毕竟是一个多维、多控制变量的系统，上述方法对于对称的多相电机或许有效，但是对于不对称的多相电机（如双 Y 移 30° 电机或四 Y 移 15° 电机等）由于其他维中的变量不加控制，则可能会产生较大的电流谐波，从而增加了损耗及输出转矩脉动。为此可以采用一个全阶解耦变换矩阵，把多维耦合系统变换成多个解耦的系统，对每个解耦系统分别加以控制，以产生最佳的控制效果。

以双 Y 移 30° 6 相异步电机为例，其解耦变换矩阵选择为

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\frac{\pi}{6}) & \cos(\frac{4\pi}{6}) & \cos(\frac{5\pi}{6}) & \cos(\frac{8\pi}{6}) & \cos(\frac{9\pi}{6}) \\ 0 & \sin(\frac{\pi}{6}) & \sin(\frac{4\pi}{6}) & \sin(\frac{5\pi}{6}) & \sin(\frac{8\pi}{6}) & \sin(\frac{9\pi}{6}) \\ 1 & \cos(\frac{5\pi}{6}) & \cos(\frac{8\pi}{6}) & \cos(\frac{\pi}{6}) & \cos(\frac{4\pi}{6}) & \cos(\frac{9\pi}{6}) \\ 0 & \sin(\frac{5\pi}{6}) & \sin(\frac{8\pi}{6}) & \sin(\frac{\pi}{6}) & \sin(\frac{4\pi}{6}) & \sin(\frac{9\pi}{6}) \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(5.4-22)

该矩阵把六维空间分解成相互正交解耦的三个子空间，分别称为 $d-q$ 子空间、 z_1-z_2 子空间和 o_1-o_2 子空间，在每

第5章 特种电力推进装置

1 船舶侧推装置

船舶侧推装置 (side thruster), 也叫横向舵、横向喷流舵, 是指在船舶水线以下横向套筒中的一种特殊的横向推进装置, 其推力的大小和方向可由控制系统操纵而改变。它装设于船首、尾部较低处, 以便于在船舶低速航行时和布置在船尾部的常规舵协作以完成转向操作, 以及当船舶停车或后退时能获得较好的控向性能。侧推器的轴向与船舶舦剖面相垂直, 位于船首底部者称首侧推器 (bow thruster), 见图 5.5-1。装于船尾者为尾侧推器 (quart thruster)。由于船尾有螺旋桨和舵设备, 因此尾侧推器的安装工艺复杂、成本相对较高, 故船舶安装侧推器多只布置在首部。

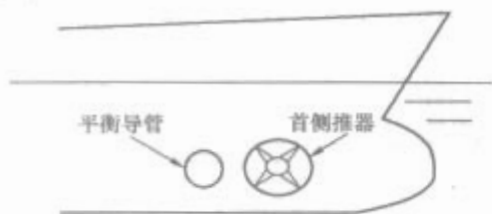


图 5.5-1 首侧推器

船舶上所安装的侧推器均为隧道式推进器, 它工作时利用布置在横向导管中的螺旋桨所产生的推力来实现船舶改向。为了增加首侧推器的使用效果, 有的船舶还在其后侧另开设一个中空且左右贯通的平衡导管 (见图 5.5-1)。侧推器可采用固定螺距螺旋桨或可变螺距螺旋桨作推进器, 其转速一般有 2 到 3 级, 而且它直接在驾驶台遥控。这样, 根据实际需要通过操纵手柄 (或按钮) 就能控制其转动方向和转速达到操控船舶的目的。

1.1 船舶侧推装置的工作原理

船舶侧推器的结构很简单, 在船舶一端或两端的水下部分作横贯船体的管道, 内装螺旋桨, 如图 5.5-2 是位于侧推器处的船体横剖面示意图。从图中可看出: 当螺旋桨转动时, 分别从管道口 1、2 吸入水流, 从管道口 3、4 排出水流, 形成向船侧的排出流。从管道口 1、2 对称吸入的吸入流, 对船体无横向作用力, 而从管道口 3、4 排出的水流, 其排出流方向由半环形罩筒控制, 如图 5.5-3 所示。图 5.5-3 是管道口 3、4 的俯视图。由图 5.5-3(a) 可见: 半环形罩筒口朝左, 排出流从管道口 3 排出, 管道口 4 中无水流排出, 这是完全不对称排出, 使船体获得最大的向右舷方向的推力; 由图 5.5-3(b) 可见: 半环形罩筒口朝右, 排出流从管道

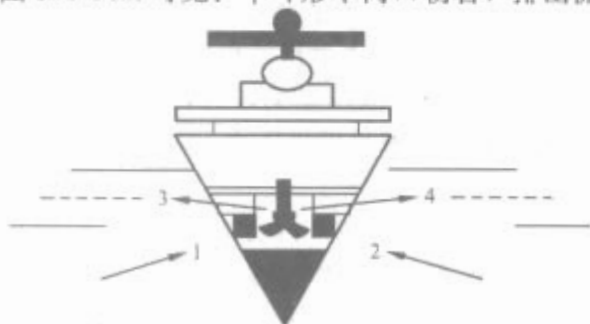


图 5.5-2 侧推器在所作横剖面上的位置

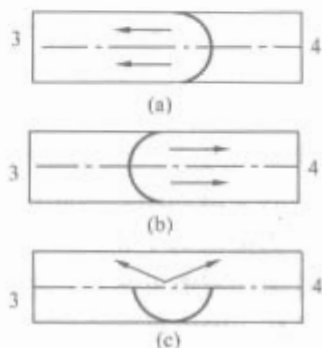


图 5.5-3 管道口 3、4 之俯视图

口 4 排出, 管道口 3 中无水流排出, 这也是完全不对称排出, 使船体获得最大的向左舷方向的推力; 由图 5.5-3(c) 可见: 半环形罩筒口朝前, 排出流从管道口 3、4 对称排出。对船体无横向作用力; 当半环形罩筒口朝非前、非左、非右的某一位置时, 排出流分别从管道口 3 和管道

口 4 不等量排出, 这种不等量排出使船体获得向左右舷方向的推力差, 推力差的大小和方向由半环形罩筒口的位置确定, 控制半环形罩筒口的位置可任意获得所需的作用在船舶上的侧向力。

1.2 船舶侧推装置控制系统的组成和原理

按推力控制方式的不同, 船舶首侧推装置分为定距桨侧推器与调距桨侧推器: 定距桨侧推器一般通过控制液压马达转速与转向获得不同的推力; 调距桨侧推器通常利用电动机作为原动机, 通过调节桨的螺距获得不同的推力, 因而其控制系统相应地分为定距桨侧推器控制系统和调距桨侧推器控制系统。

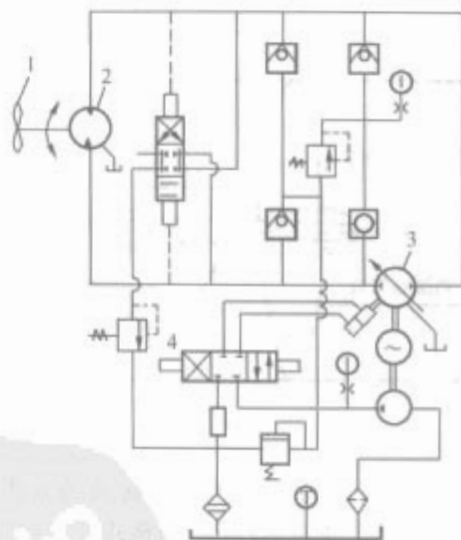


图 5.5-4 定距桨侧推装置控制系统原理图

1—定距桨侧推器; 2—液压马达;
3—变量液压泵; 4—电磁换向阀

1.2.1 定距桨侧推器控制系统

固定螺距首侧推装置主要的组成部分如下: 定距桨、液压马达、变量液压泵、电磁换向控制阀、辅助定量泵、溢流阀以及单向阀等。定距桨侧推装置控制系统原理见图 5.5-4: 定距桨 1 经联轴器与液压马达 2 相连, 液压马达的转向和转速由变量液压泵 3 产生的液压油的流向和流量来控制, 而变量液压泵的进口方向和排出量受控于电磁换向阀 4。系统工作时, 变量液压泵的电动机带动泵运动, 当伺服变量机构处在零位时, 变量液压泵零功率输出。通过电磁换向阀的动

作,改变液压变量泵伺服机构的位置来改变变量液压泵的进出口方向和压力油的排量,驱动液压马达正转或反转,提高或降低液压马达的转速,从而达到改变船舶侧向推力的方向和大小的目的。

液压马达驱动螺旋桨的方式有两种,即垂直式和直碰式,如图 5.5-5(a)和图 5.5-5(b)所示。其中,图 5.5-5(a)又称为垂直整体式,其特点是由位于侧推器内的液压马达通过配对伞齿轮来驱动螺旋桨转动,液压马达与螺旋桨的轴线是相互垂直的,配对伞齿轮非常精密,结构相当紧凑,所以往往做成整体式的。这种型式的优点是液压马达及其相关的油管位于舱室内,且传动轴亦包在密封铸件内,较好地解决了船用推力装置的水下密封及推力轴的润滑问题,因此这种型式的侧推器是较受欢迎的。但这种侧推器的主要缺点是价格昂贵,技术含量很高,只有少数欧美国家能够生产,国内船厂多数用的是德国 SCHOTTEL 产品,国内虽有合资厂家能生产,但多是进口零部件组装,价格亦不菲。图 5.5-5(b)是驱动马达与螺旋桨同轴线直接接合的型式,这种型式的侧推器结构比较简单,精度较低,工艺也不复杂,虽然存在水线下布油管等问题,但其突出的优点是价格低廉。

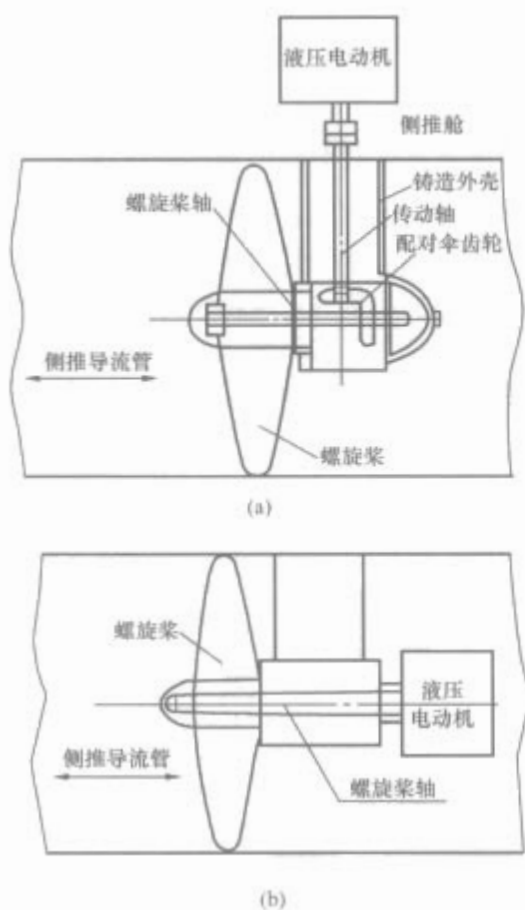


图 5.5-5 液压马达驱动螺旋桨的方式
(a) 垂直式; (b) 直碰式

1.2.2 调距桨侧推器控制系统

1.2.2.1 调距桨侧推器

调距桨侧推器主要是由可调距桨、首侧推电机、驱动电机起动器、电动液压模块等组成。

(1) 可调距桨(含导管)。可调距桨是首侧推装置的重要组成部分之一,首侧推装置使用的可调距桨一般带有单层导管,用于导流,所以首侧推装置又叫隧道推进器,有些特殊规格的侧推装置还配有双层导管,可以有效的降低噪声,但价格很高。从经济性考虑,选择单层导管的可调距桨即可,桨叶材料为镍铝青铜。可调距桨带有螺距传感器,可以输出当前螺距信号。

(2) 首侧推电机。首侧推装置的原动机采用三相异步电动机,为螺旋桨提供动力。首侧推电机有立式和卧式两种安

装方式,通过传动装置带动螺旋桨转动。首侧推电机转速不控。首侧推电机运行中需要注意过载问题,螺距变化过快,负载过重都容易导致电机过载,除过载保护外,选型时应该留有一定的转矩裕量。

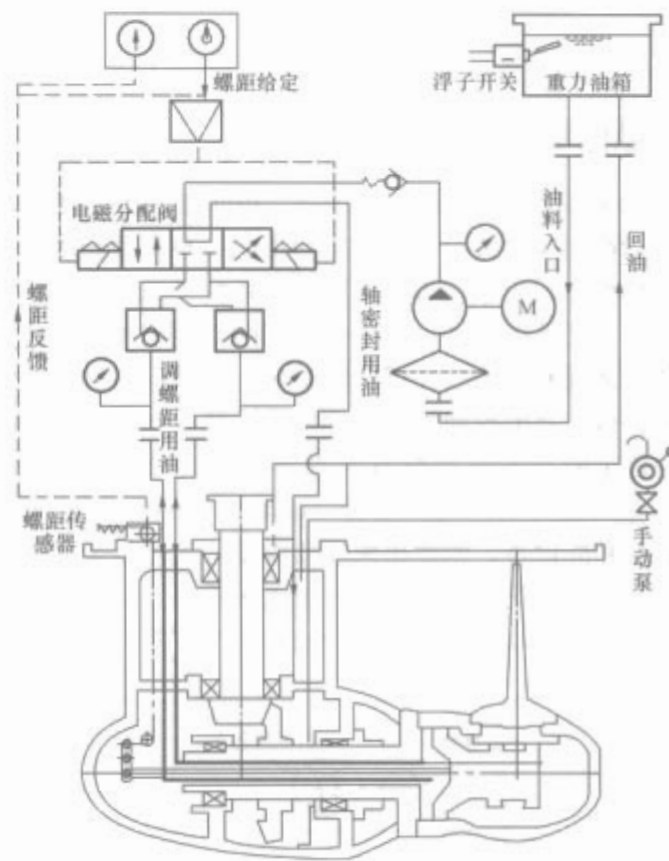


图 5.5-6 首侧推液压系统示意图

(3) 驱动电机起动器。对于调距桨的驱动电机,绝大多数采用笼型电动机。它的起动电流一般为额定电流的 6 倍,应根据船上电网的条件选择适当的起动方法。当容量较大的三相异步电动机直接投入电网起动时,会产生过大的起动电流,导致电网电压下降以及电机过热。

目前一般采用降压起动方式,利用 Y/△ 起动器降压起动是较为经济的一种。采用 Y/△ 起动器起动时,电动机起动电流为直接起动的 $1/\sqrt{3}$, 起动转矩为直接起动的 $1/3$ 。Y/△ 起动器通常带有时间继电器和热动继电器,时间继电器整定为电机起动时间,用于电机起动后将定子绕组从 Y 形切换为△形接法;热动继电器用于过载保护。

为了进一步减小起动电流,可采用自耦变压器降压起动,如电动机侧抽头为 45%, 设直接起动电流为 600%, 则此时的起动电流为 120%, 起动力矩也降至 20%, 考虑到对起动力矩的要求,对起动电流的降低应有限制。

此外,还可以采用具有很好软起动特性的交流变频器作为驱动电机起动器。对于调距桨侧推装置,为起动大容量电动机,交流变频器以交流调压方式限制电动机的起动电流,接近于恒电流软起动。带电流限幅的电压自动爬升。它不仅可以实现软起动,使机械传动系统平稳加速,而且可以实现软停止,这对泵的传动系统是很有好处的。

(4) 电动液压模块。电动液压模块有三个作用:为首侧推装置的螺距调节提供液压动力;为首侧推传动装置的轴(如伞齿轮轴与桨轴)密封提供压力;对机械装置起到润滑和冷却作用。

电动液压源模块一般由重力油箱、电磁分配阀及油泵电机等组成。重力油箱为液压单元提供油料,油料在重力作用下进入液压泵,油泵电机拖动液压泵,将油料压入电磁分配阀。在电磁分配阀内,一部分油料作为调螺距用油,推动调

距伺服油缸；另一部分作为轴密封用油，为传动机构轴密封提供压力，回油经过过滤器后回到重力油箱。油料同时还起到润滑和冷却作用，通过水下部分油料与海水热交换实现油的冷却。液压系统见图 5.5-6。其中，螺距传感器用于实现螺距的闭环控制及实际螺距值的指示，手动泵用于侧推桨体中的油料填充。电动液压模块本身应该配置液压安全阀，防止伺服油压力过大损坏液压装置。

1.2.2.2 操控系统

操控系统利用首侧推装置各部分提供的接口对首侧推进行操纵，指示其状态并提供必要的保护。首侧推控制系统框图见图 5.5-7。

- (1) 首侧推各组成部分需要实现的接口。
- (2) 系统操纵模式。首侧推提供三种控制模式：驾驶室及两翼遥控模式、侧推舱本地控制模式、DP 控制模式。驾驶室及两翼操纵主要通过驾驶室各控制台面板实现遥控；侧推舱本地控制模式通过机旁控制柜直接操作侧推装置；DP 控制模式中，处于驾驶室的 DP 系统接管侧推的控制权。其中，侧推舱操纵优于驾驶室操纵，驾驶室操纵优于 DP 模式操纵。
- (3) 操控系统功能。首侧推操控系统主要实现起动、调距、负载限制及保护功能，各功能描述如下。
 - 1) 首侧推起动：首侧推起动前，需要向 PMS 系统进行重载问询，只有 PMS 系统允许重载起动时，才能起动首侧推装置。起动时，要保证伺服油压已经建立，同时调距桨处于零螺距状态。当按下首侧推起动按钮后，控制系统先起动液压泵电机，当液压系统伺服油压达到某一阈值时，才能进行首侧推电机的起动。起动首侧推电机时，先问询零螺距指示装置，确保螺旋桨螺距为零时才起动首侧推电机，否则先调节螺距为零，当首侧推电机起动完毕，发出一个首侧推就绪信号，指示此时可以对螺距进行调节。
 - 2) 首侧推停车与紧急停车：当收到停车命令后，控制系统首先调节螺距为零，然后依次停止首侧推电动机，液压泵系统。当收到紧急停车命令后，控制系统直接停止首侧推电动机和液压泵系统。
 - 3) 螺距调节：当首侧推处于正常状况时，可以对螺距实现随动控制，通过操作手柄给定一个螺距信号，控制系统实现螺距的闭环调节。同时控制系统应该具有限制螺距变化率的功能，在满足螺距响应时间的前提下，防止螺距变化过快导致首侧推电机过载。当控制系统处于故障状态时，通过应急操纵按钮进入应急操纵模式，使用硬连线连接到螺距调节装置，对螺距进行非闭环控制。
 - 4) 负载限制：控制系统获取从配电板或 PMS 系统过来的信号，当发电机容量较低时，首侧推功率达到某个限制

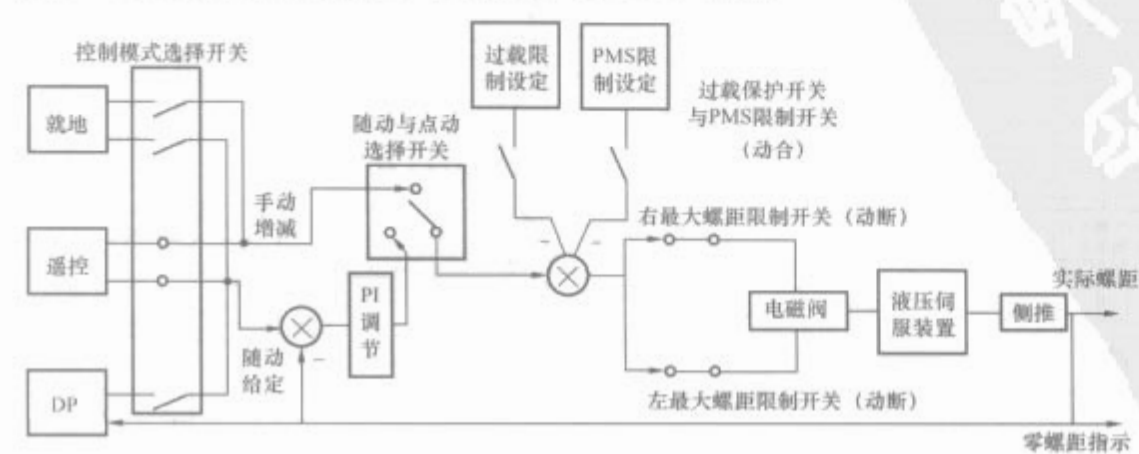


图 5.5-7 首侧推装置控制系统框图

值，自动减少螺距，从而限制负载功率，如果过载保护动作后过载依然存在（例如桨轴挂住渔网），则在一定时间后使首侧推停车。

- 5) 最大螺距限制功能：当左右螺距达到最大值时，为防止液压系统继续作用损坏机械部分，对最大螺距进行限制，一旦达到最大螺距，最大螺距限制开关打开，电磁阀闭锁，停止进一步增加螺距。
- 6) 首侧推装置的保护：当出现首侧推电机风机故障、首侧推电机过载故障、首侧推电机超速故障、首侧推电机冷却水泄漏故障、首侧推电机滑油压力低、伺服油压低故障、液压系统过载故障、重力油箱油位低等故障时对系统提供必要的保护，并给出一个首侧推故障的综合报警信号。

1.2.2.3 控制系统工作原理

如图 5.5-8 所示的变螺距侧推装置控制系统主要是由可变螺距桨、驱动电动机、电磁分配阀、指示控制单元、液压动力站以及螺距角发送器等组成。当控制指示单元 4 发出操作指令后，电磁分配阀 3 打开，液压动力油经电磁分配阀加载于可变螺距侧推装置的伺服油缸，伺服油缸活塞带动桨叶的转动。当螺距角为零时，推力为零；当桨叶转动，螺距角为正时，推力方向朝左，则船首向右回转；当螺距角改变为负时，推力方向朝右，则船首向左回转。只要改变螺距角的方向及大小就可达到改变船舶侧向推力的大小和方向的目的，侧推器的控制操作灵活简便。

1.3 船舶侧推装置的典型控制系统

船舶侧推装置的应用日益广泛，常见的产品有日本 KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES 公司的 KT 系列侧推装置、日本 NAKASHIMA 某公司的 TCN 系列侧推装置等。图 5.5-9 所示的是日本 KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES 公司的 KT-B 系列侧推装置典型控制示意图。当系统正常工作时，控制操纵的位置有三个：驾驶室驾控台和驾驶室两翼控制板桥楼控制。在非正常情况下，在机旁进行就地非跟踪的操纵控制。

若控制位置选在中央控制台，则通过电切换电路接通中央控制台的控制电路，在中央控制台的面板上，改变桨叶角度的设定，驾驶室控制台的操纵手柄的设定角度信号进入跟踪放大器，跟踪放大器的另一路信号来自桨叶角度的反馈。经比较两个输入信号的差值，放大控制器给出新的控制输出信号来驱动电磁换向阀，从而选通液控分配器，液压油经液控分配器控制可变螺距侧推器的伺服油缸，油缸活塞的移动使桨叶的角度发生偏转，同时桨叶角度发送器检测到角度的变化，当该反馈信号和操纵手柄设定的角度信号一致时，放大控制器的控制输出信号为零，电磁换向阀失电，液压控制回路关断。这样就完成了一次变螺距桨跟踪操纵手柄角度的设定。

当可变螺距侧推装置的螺距角大幅度改变时，原动机极易发生过载，过载保护电路的设置是完全必要的。KT-B 型控制系统的过载保护电路调节过程如下：

扭矩→过载设定值↑→放大控制器反向输出大于零→驱动伺服油缸→桨叶偏转角→过载设定值↓→扭矩→过载保护输出↓→放大控制器输出等于零→螺距角新的位置上平衡。

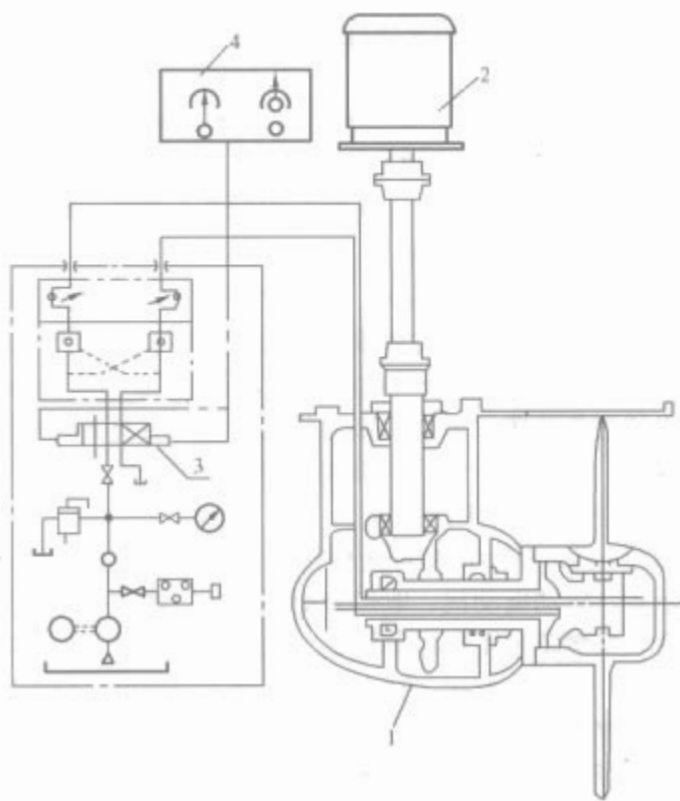


图 5.5-8 变螺距侧推装置控制系统原理图
1—变螺距桨；2—驱动电动机；
3—电磁分配阀；4—控制指示单元

最大螺距角限制电路是为了防止可变螺距首侧推器机械部件受意外的强力损坏而设计的。该限制电路具有双重检测功能，无论桨叶是处于正螺距角还是负螺距角，只要其角度的绝对值达到设定限值的其中的一个，限制电路便会输出一个信号，使相应控制通道的回路断开。例如：当左向最大螺距角限制电路检测到螺距角已达到最大设定值时，这个检测

电路的输出状态由“0”翻转为“1”，驱动继电器 PM 继电器得电使放大控制器相应的输出通道因此而断开，从而保证了螺距角限制在设定值的最大位置。右向最大螺距角限制电路的控制原理相同。

可变螺距首侧推装置通常按照下列步骤操作：

- (1) 主发电机设计时所需台数并联运行信号输出。
- (2) 液动力源起动。
- (3) 主电动机零螺距空载起动。
- (4) 操纵手柄设定螺距角，首侧推装置按设定的要求方向、推力工作。

1.4 船舶侧推装置的选用要点

选用船舶侧推装置的各个组成构件，要考虑以下六个因素：

- (1) 船型：侧推器安装在船的舷部，在选择侧推器大小时，除了考虑推力的大小外，首先要注意的是该船的首部线型，要能够安装。其次还要考虑船的肋骨间距，对于中、小型船舶，应尽量不伤及肋骨。
- (2) 航区：选用的侧推器的容量应能解决船舶定位问题，其推力应能克服风、浪和水流的作用。
- (3) 侧推器容量：根据船舶在水线以上和以下的侧面积估算推力，取其大者作为设计推力，但在船型受限制的情况下，应以最大安装限度为标准设计侧推器的容量。
- (4) 功率选择：根据计算出的推力值选定原动机的功率，经验数据是 1 马力（1 马力=735.499W）原动机功率可产生约 107.8N 的推力。
- (5) 类型选择：定距桨结构简单，制造方便，使用可靠，但其操纵性能差；调距桨操纵性能好，但结构复杂，制造困难，成本高。

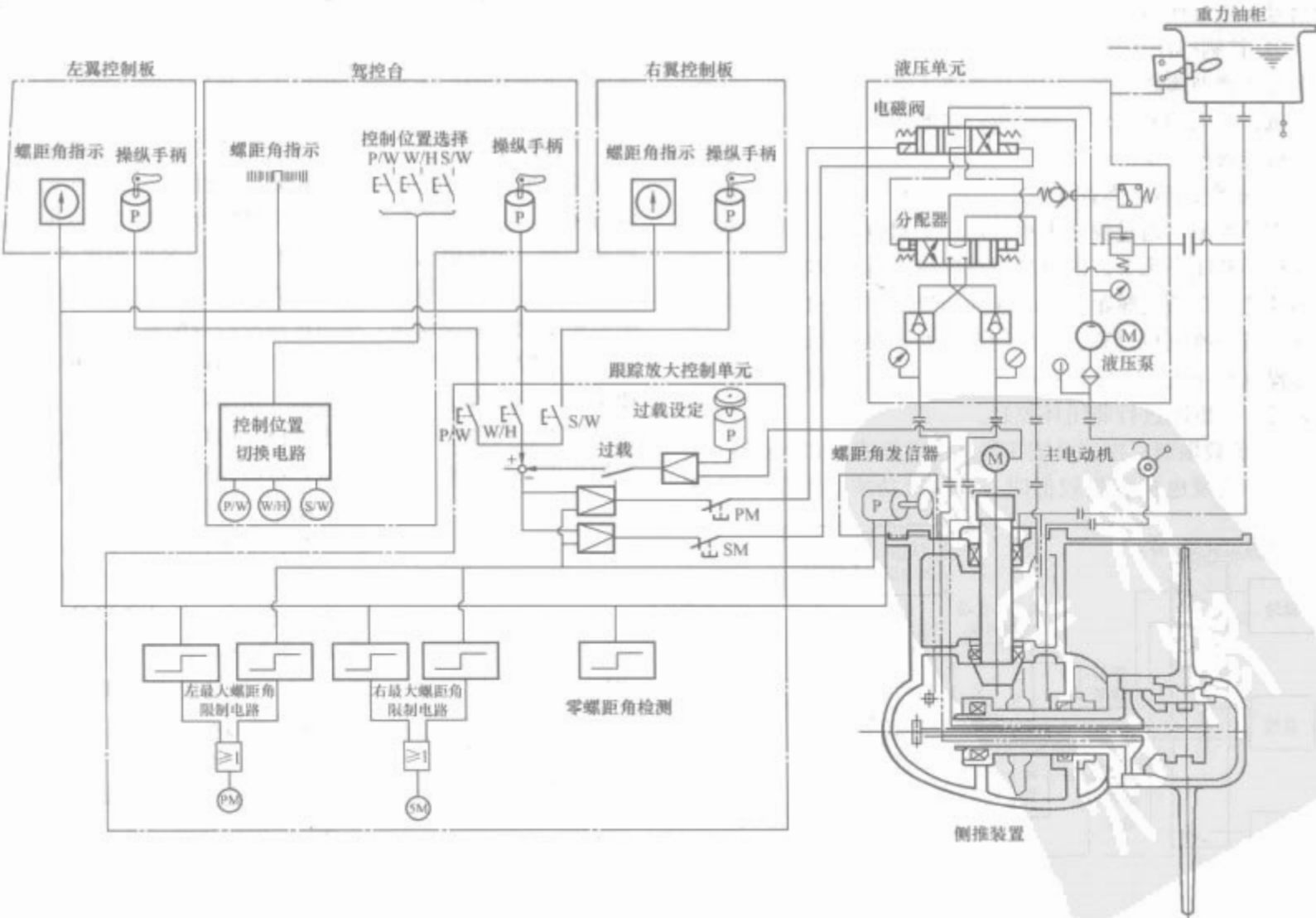


图 5.5-9 KT-B 型侧推装置控制系统示意图

(6) 原动机选择: 侧推器的原动机形式有电动机、柴油机和液压马达三种。电动机初期投资省、使用方便、体积小、噪声小, 但船上需配置较大容量的电站; 柴油机体积大、噪声较大、设备较复杂, 但独立性强; 液压马达通常用在小船上, 液压元件造价较高, 维修工作量大。

1.5 侧推力器的设计举例

以琼洲海峡某 21 车渡轮为例, 介绍安装侧推力器的设计方案。

(1) 21 车渡轮的主要尺度:

满载排水量 $\Delta = 1191.915\text{t}$

航速 $V = 10\text{节}$

肋骨间距 $S = 0.55\text{m}$

轻载艏吃水 $d_F = 1.48\text{m}$

水上受风面积 $A_u = 385.6\text{m}^2$

水下侧面积 $A_d = 153.1\text{m}^2$

(2) 总体设计方案。该船属于营运中的船舶, 在设计时, 首先考虑船型、电机功率、经济等条件的限制。该船艏部线型尖瘦, 在距舷垂线 6.05m 往后为水舱, 侧推力器只能安装在距舷垂线 4~5m 的三个肋位之间, 肋骨间距为 550mm, 为保证船体强度, 孔道直径不能过大。选择电动机带动, 但功率不宜过大, 以避免改动主配电板。

总体设计如下: 在距舷垂线 4~5m 的地方, 分别开两条左、右舷贯穿的孔道, 其中一条孔道在左舷侧安装螺旋桨, 另一条在右舷侧安装螺旋桨。螺旋桨用伞齿轮和轴与电动机联接, 轴上套水密环, 以防止水渗入船舱内, 电动机安装在高于轻载吃水的一个平台上, 并用线路与主配电板连接, 可以在驾驶室操纵。

(3) 侧推力的计算。参考《船舶科技简明手册》, 渡轮水上侧面积风推力的风压取 $p_1 = 44.1\text{Pa}$, 水下受水推力的水压取 $p_2 = 122.5\text{Pa}$ 。因此, 水上侧推力 $T_u = A_u \times p_1 = 385.6 \times 4.5 = 1735.2\text{kg}$, 水下侧推力 $T_d = A_d \times p_2 = 153.1 \times 12.5 = 1913.75\text{kg}$, 设计取大者, 船舶所受的侧推力 $T = 1913.75\text{kg}$ 。

(4) 螺旋桨设计。轻载艏吃水为 1.48m, 螺旋桨轴线距水面一般应为 1.5 倍螺旋桨直径, 肋骨间距为 550mm, 从安装上考虑, 确定螺旋桨轴线距基线高为 800mm, 选用直径为 380mm 的无侧斜的 4 叶桨, 转速为 400r/min。

(5) 电动机选择。该船主配电板的剩余电闸容量为 80kW, 侧推力器选用两台 30kW 的电动机分别带动螺旋桨。按经验公式, 每马力可以产生 11kg 的推力, 每个桨可产生的推力 $T = 30 \times 1.3596 \times 11 = 448.668\text{kg}$ 。

(6) 孔道设计。以螺旋桨的轴线为中心线, 开两条贯穿左、右舷的孔道。螺旋桨直径 380mm, 孔道直径 420mm。该船航速 10 节, 孔道的开口对阻力影响不大, 为有利于推力的产生, 孔道口采用圆缘形开口, 在孔道口焊稀疏的钢丝栏栅, 以保护螺旋桨。

2 船舶吊舱式电力推进

2.1 船舶吊舱式电力推进的基本原理

吊舱里的推进电机采用空冷式低速同步电动机。低速电动机直接与定距螺旋连接, 去掉了传统的传动齿轮。吊舱、推进电机以及螺旋桨连成一个整体置于船底部的水中, 其原理结构如图 5.5-10 所示。

同步电机采用同步变换器进行速度控制。对于低功率范

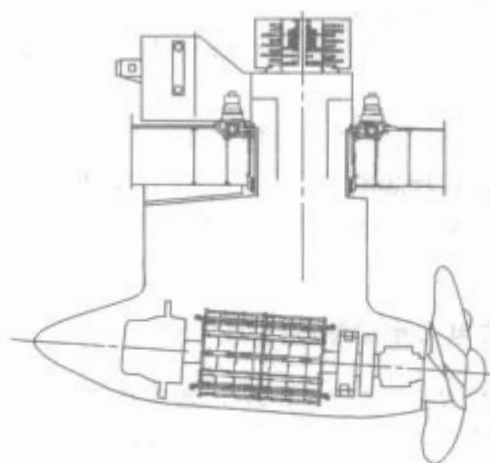


图 5.5-10 吊舱式推进装置结构图

围或特殊要求, 可用采用 PWM 变换器调速。螺旋桨方位角由电动——液压装置操纵 2~4 台液压电动机驱动钢质齿轮达到控制螺旋桨旋转的目的。液压电动机的数量取决于对操纵能力和冗余程度的要求。调节推进电机的转速和螺旋桨的方位角即可实现船舶前进、倒车、转向、调速、制动等各种航行工况, 使船舶的灵活性和机动性处于最佳状态。

2.2 船舶吊舱式电力推进的性能和特点

在吊舱式电力推进系统中, 螺旋桨和推进电机共轴, 两者之间没有任何其他环节, 结构简单、紧凑, 通常制成一个独立的推进模块。它可以在船舶试航前安装, 甚至可以在海上进行装卸。推进电机采用同步电动机 (SSP 推进器系统采用永磁式同步电动机), 这是因为同步电动机有以下特点:

(1) 电机的转速和电源的基波频率之间保持着同步关系。只要精确地控制变频器的输出频率就能精确地控制电机的转速, 也就能精确地控制螺旋桨的转速, 无须设立转速反馈回路。

(2) 同步电动机较异步电动机对转矩的扰动具有较强的承受能力, 能出现较快的响应。在同步电机中, 只要电动机的功角做适当变化, 而转速始终维持在原来同步转速不变, 转动部分的惯性不会影响同步电动机对转矩的快速响应。这样, 可以对海上风浪造成的负载转矩的变化做出快速响应。

(3) 从转速调节范围来看, 同步电动机转子有励磁, 即使在很低的频率下也能运行, 调速范围比较宽; 而异步电动机的转子电流靠电磁感应产生, 频率很低时, 转子中就难以产生必要的电流, 调速范围比较低。

(4) 从节能方面和成本上考虑, 同步电动机也是优于异步电动机的。

吊舱式电力推进系统和传统的船舶推进系统相比有如下一些特点:

1) 在布置上较传统推进器更为自由, 并且具有提供更高负载的布置潜力。

2) 船舶操纵性能好, 前进后退换向方便, 后退时的操舵力强。

3) 电动机内藏于吊舱内, 振动小、噪声低, 螺旋桨对船体振动的影响更小, 取消了尾轴、尾侧推器、舵机系统等, 不需专门的冷却系统, 从而节省了舱容, 简化了安装。

4) 推进装置或模块结构, 安装时间短, 费用低, 且可在船舶建造的最后阶段交付安装, 安装和拆卸吊舱时也不必进坞。

5) 水动力效率高, 燃料消耗率低, 有利环保。据水池试验和海上试航结果, 与传统推进装置比较效率约高 10%; 用吊舱式推进装置的螺旋桨比常规系统的螺旋桨要小, 产生

空泡现象的临界速度高。

6) 对于双桨船而言,该系统与传统推进器相比,对动力的需求有所降低。

7) 根据需要决定并入电网的发电机台数,使每台机组都能工作在比较理想的负荷下,不仅对柴油机良好燃烧和使用重油有好处,而且可以减少维修保养工作和降低备件费用。

2.3 吊舱式电力推进器的适用范围

单机最大功率:21~32MW;最大航速:26~30kn;最大螺旋桨直径:6~8m。适宜于吊舱式电力推进的船舶有豪华客轮、浮式生产储卸船、半潜式平台、穿梭油船、渡船、平台供应船、化学品船、军用舰船、科学考察船、潜艇、布缆船、海洋调查船、破冰船、救捞船、渔船等。吊舱式推进系统和发电站的概念在满足环保低排放要求方面有其明显的优势。研究分析表明,柴油机在变速运行工况下的氧化氮排放物比在恒速运行工况下的要高得多,而吊舱式推进系统正是通过发电站使中速柴油机在恒速工况下运行,并始终在优化负荷点附近运行,因此其废气排放将显著降低。随着对环保要求的进一步加强,很多船舶尤其是近海航行船舶将会选用电力推进,电力推进是使用新型能源如燃料电池等的最佳平台。

鉴于吊舱推进装置使得船舶操纵性提高、船型优化、环保能力增强,人们普遍认为,新造的豪华油船都将配备这种推进系统。其他油船也可以通过改装加上吊舱以提高营运航速和操纵性能。ABB公司在一艘28000总吨的滚装客运渡船的研究表明,利用在单轴推进装置的螺旋桨后面加装一个螺旋桨反向旋转的吊舱来替代双轴双舵方案,同样以27.5kn航速营运,功率可以降低10%~15%,氮氧化物和硫氧化物的排放量也降低同样比例。尽管造船费用会增加20万美元,但每年能节省100万美元的燃油开支。

2.4 吊舱式对转螺旋桨(CRP)系统的结构原理和特点

2.4.1 吊舱式对转螺旋桨(CRP)系统的结构原理

交流电机的变频调速技术的发展和吊舱式推进器的成功应用,使越来越多的业内人士看好船舶电力推进。ABB公司于1990年首先推出吊舱式电力推进系统,获得了巨大成功。在此基础上,2000年推出了吊舱式CRP系统。不难看出:前螺旋桨就是传统推进系统的螺旋桨,而在传统舵叶所在的位置,安装上了一个可360°旋转的吊舱式推进器。两个螺旋桨位于同一轴线上,转向相反。一般情况下,前螺旋桨由柴油主机驱动,也可以由电动机或汽轮机驱动;而后面的吊舱式推进器,还起着舵的作用。我们称其为“主动舵”,而传统的舵则称为“被动舵”。

2.4.2 吊舱式对转螺旋桨(CRP)系统的特点

(1) 该系统是由两套完全独立,且经过实船检验,证明可靠性很高的推进系统组成,船舶运行的安全性和可靠性得到了保证。

(2) 船舶的推进功率可以在几乎不增加机舱空间的前提下,较大幅度的得以提高。

(3) 取消了舵机系统和尾侧推器,总体上简化了机械结构。

(4) 船舶的机动性和灵活性得以提高。

2.5 主要产品

目前世界上吊舱式电力推进器系统类型主要有:

(1) 约13年前,当时芬兰海事局开始寻求在冰区航行具有更高性能的破冰船的解决方案,其初步想法是推进电机应该提供任意方位的推进力,由此ABB便提出了Azipod的原型方案并提交给KvarnerMasa船厂制造,相关的Azipod推进技术也申请了专利。1990年开始装船应用。1993年和1995年又装备于2艘1600载重吨的破冰油船。取得引人注目的成果后,1998年在卡尔尼弗尔旅游船公司的大型旅游船Elation号上得到应用。

在Elation号上,2台14000kW的Azipod代替了传统的发动机、桨轴、舵系和3台推进器。经试航验证,该装置大幅度提升了船舶的经济性和驾驶性能,最大航速时的回转半径缩小30%,能量利用率提高8%,1周可节约燃料最多达40t,振动也大幅度降低。

Azipod吊舱式电力推进系统已成为大型豪华游轮的标准配置。自1990年第一套Azipod系统安装下水,截止到2001年8月,ABB公司收到Azipod系统的订单共计101套(总装机功率1067MW),其中45套系统已交付使用(总装机功率376.6MW),累计运行时数已超出30万小时。

(2) Kamewa与Alstom从1995年起开始合作,他们的合作促成了新一代吊舱式推进装置——“美人鱼”的产生,“美人鱼”所使用的所有元件都已经过认证,并且已在其他领域中展现了其良好的性能。为了适应船厂、船舶所有人和船舶运营者的要求,整个系统都是为了提高吊舱推进的优点进行设计和研究的。柴油机和电力推进装置,特别是吊舱式推进系统实现了技术上的突破。

Kamewa公司是推进器供应商,主要为旅游船市场供应调距桨,并且提供了2200台机械式侧推器。最新开发的“美人鱼”吊舱式推进系统与Azipod推进系统不同的是,电动机的定子与椭圆体热压配合,并且采用向周围海水传热的部分冷却方法。由于此种冷却方式,“美人鱼”吊舱式推进系统比Azipod全空气冷却推进系统的直径要小,因此改善了螺旋桨流体动力的效率。

从1981年至1999年,Alstom为110多艘船舶安装了电力推进系统,总功率达到1500MW。另一方面,在两年之内,Alstom和Kamewa两公司接到了30多份订购“美人鱼”装置的订单。

(3) 德国的两家研制电力推进系统和推力器的专业公司Siemens和Schottel合作生产了另一个对方位吊舱有竞争力的装置,即SSP。在该吊舱中装有Siemens公司的新型永磁励磁同步电动机,以便用来驱动Schottel公司制造的双螺旋桨系统:两个螺旋桨一前一后安装在同一加长轴上,其旋转方向相同。

SSP利用了Schottel双螺旋桨设计思想和大功率的优点。吊舱前后的两个螺旋桨均担负载,每个螺旋桨各分担总负载的50%。吊舱的外面焊有两个飞机尾翼状的翼片。整个系统的效率可提高20%。电动机采用表面冷却,没有冷却风扇。该系统优于其他系统的一个突出优点在于大小和质量方面。常规柴油机电力推进系统的质量为760t,而同等功率的SSP系统的质量为510t。其电动机有两个独立的绕组,在应急情况下允许以一半的功率运行。按照Siemens公司的分析,这种电动机用于其他类型船所节省的功率比应用于旅游船所节省的功率要高。上海爱德华造船厂已完成了一项额定功率为5.1MW的SSP7的西门子——肖特推进器(SSP)的合作合同。最新开发的吊舱驱动装置被安装在由瑞典公司订购的载质量为19500t化学品运输船上。该船由位于瑞典乌德瓦拉的FKAB设计,按照DNV冰级1A制造,

在波罗的海海域航行。

(4) 荷兰的 Lips 及德国 STNAtlas 船舶电气公司为了不使自己置身于这个市场之外,最近展示了“海豚”吊舱系统。Dutch 公司参加了螺旋桨的设计及生产试验,而它的德国合作者开展了电力推进系统的研究工作。六相同步空冷电动机将由 Bremen 的 LloyaDynamo-Werko 公司制造。

“海豚”系统可提供的功率范围是 3~19MW,但也可提供更高额定功率的装置。在标准配置状态下,双电枢电动机由同步转换器进行速度控制,对于较低的功率范围或特别的要求,可利用脉宽调制(PWM)转换器。采用前后安装螺旋桨还可实现反转。“海豚”和“Azipod”一样都采用空气冷却定子和转子,这使采用对转螺旋桨成为可能。为实现对转,让“定子”也转起来。由于电机内部定子和转子的运动方向相反,将一个螺旋桨安装在转子轴上,另一个螺旋桨安装在定子上,使两个螺旋桨对转。

“海豚”驱动船舶的推进性能比普通的定距螺旋桨驱动要好 5%~8%,其改善的主要原因是取消了舵、附属部件、轴系及尾推进器,以及尾部设计的最佳化。与普通的双螺旋桨结构相比,进入到推力螺旋桨的轴向流场得到了改善,结果空泡特性变好、扰动小、噪声低,所需推进功率减少了。

2001 年 2 月, Radisson SevenSess 公司订购了采用一对 7WM 驱动的 50 000t 的 SevenSeas Voyager 号船,在意大利 Genoa Mariotti 船厂建造。

2.6 发展应用

由于吊舱带动螺旋桨,可旋转 360°,因而可在任何需要的方向产生推力,可以不需要舵和侧推器,机动性有所增加;由于驱动电动机位于船体之外,不需要轴和轴架,可以节省船舱空间作其他用途;由于推进器和原动机不需要直接连接,所以船舶设计和动力装置的布置具有更大的自由性;螺旋桨顺应水流,减少了附体的阻力,推进效率明显地提高了;倒航时,回转和操纵性能优良,提高了紧急停船的性能;由于吊舱浸在海水中直接向外散热,故驱动电动机不需要冷却。另外,整个推进系统的噪声低,振动小,干扰小。在造船过程中,推进器可以晚点交付使用,因此可以消除投资成本的闲置时间,整个船舶的建造时间也可以相应缩短。

3 船舶超导电力推进

3.1 船舶超导电力推进装置的发展

船舶超导电力推进装置是用高效能的超导电机来取代普通电机的一种新型、先进的电力推进装置。经过 40 年的历程,无论是直流系统或是交流系统,从低温超导向高温超导,从设备研究向系统开发都取得重大进展,包括超导推进电机在内的船舶超导电力推进装置研究已接近实用化程度。尽管该项技术尚未在船舶上获得实际应用,对它的认识有些是基于在理想状态下估算的,还有待更多的实践考核和进一步修正,但是作为船舶推进动力的发展方向其前景是十分广阔和令人鼓舞的。

超导电力推进装置的核心设备是超导推进电动机,主要有超导单极电机、超导同步电机,还有超导异极电机(即超导换向器式直流电机)、特种超导电机等。但前两类电机更具有广泛的研究基础,较为成熟,尤其是超导同步交流电机前景更为看好。

直流超导电力推进系统采用的是超导单极电机,到目前为止,世界上已经研制成功 20 多台功率不等、型式各异的

低温超导单极电机,2200kW 和 1000kW 超导单极发电机和电动机已进行推进系统实船试验。近期,美国正在进行一台 36.5MW,120r/min 全尺寸舰船超导直流单极推进电机和相关的支持设备的设计、制造和工厂试验。另外,当高温超导(HTS)材料出现后,HTS 单极电机的研究也取得相应的进展,已经完成多台百千瓦级电机研制。图 5.5-11 是我国研制成功的,以船舶电力推进为最终应用目标的 300kW 低温超导单极电机试验样机。

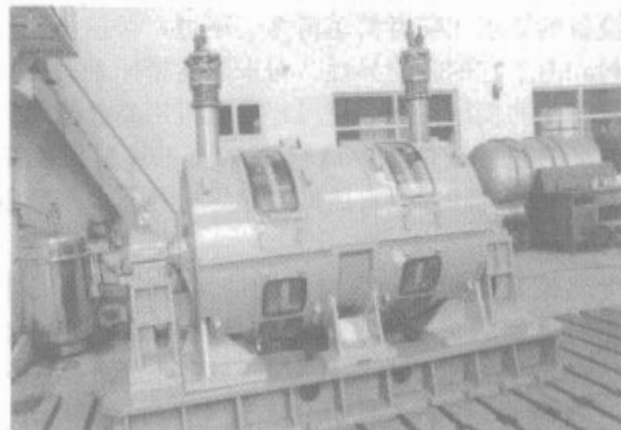


图 5.5-11 300kW 超导单极电机

交流超导电力推进系统采用的是超导同步电机,美国超导公司等已连续研制成功 220kW、735kW、3.7MW (1800r/min) 和 5MW (230r/min) HTS 同步电动机。2007 年 3 月又成功通过海军验收试验,完成了 36.5MW 120 r/min HTS 同步电机研制,拟用于 DDG-1000 驱逐舰上。此外,还计划用四套 40MW HTS 推进发电机和电动机作为下一代 CVX-13A 航母电力推进动力备选方案之一。德国、韩国、日本、法国、英国、俄罗斯和一些发达国家正在进行各种类型 HTS 同步电机研制。我国也已完成百千瓦级样机的研制。图 5.5-12 是美国 5MW 230r/min HTS 同步电机试验照片。

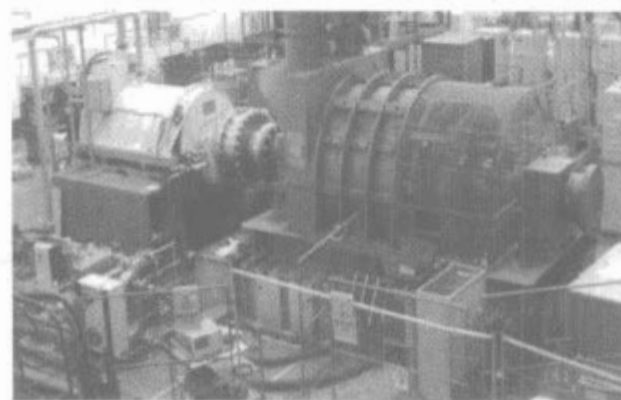


图 5.5-12 (美)5MW HTS 同步电机(图左边)

3.2 相关的超导电性概念简述

超导体具有三个临界参数,即:在没有外磁场的情况下,当超导体的温度被降低到某一数值时,处于正常态的超导体将转变为超导态,其电阻值会突然降为“零”,从而具有了超导电性,该临界点的温度即为临界温度;当超导体的温度低于临界温度,对应该温度的外磁场增大到某一限值时,处于超导态的超导体将转变为正常态,该磁场限值即为临界磁场;通过超导体的电流达到某一限值时,也可以发生超导态的破坏,使处于超导态的超导体转变为正常态,该电流限值即为临界电流。这三个参数不是独立的,而是相互关联、彼此对应的,临界电流一般是随着温度和外磁场的增加而减少。所以,超导材料运行参数超过临界值时就会失去超导电性,出现电阻进而发生“失超”现象,实际上超导电机

磁体运行参数应设计得比超导材料短样特性参数更低，这是因为考虑了使用长线和由线材绕制成超导磁体后所带来的影响，而且也是为了留有余量以保证电机运行安全。

所谓低温超导，通常是指超导材料的临界温度较低，只能运行在液氮温区，用沸点温度为 4.2K 的液氮冷却。所谓高温超导，实际上只是一种相对概念而言，通常是指超导材料的临界温度较高（目前已经有很多达到 100K 以上），可以运行在液氮温区，用沸点温度为 77K 的液氮冷却。后者对低温设备的要求比前者简单得多。不过，目前第一代高温超导材料，由于它的各向异性、对于超导带面垂直磁场的敏感性以及较差的机械性能，使得超导电机用高温超导线材绕制成强磁场的超导磁体，多运行在 30~35K 的温度下，使用液氮或冷氦气冷却，但它比低温超导材料需要用液氮冷却也简单许多。

超导电机就是用超导线材绕制的超导磁体取代普通电机中用铜材绕制的铜线圈。正是由于利用超导材料的“零电阻”特性，使得超导电机具有了一系列的优点为人们所青睐。低温超导电机多采用的是铌钛（NbTi）、铌三锡（Nb3Sn）低温超导材料；目前高温超导电机多采用的是铋系 Bi2223 高温超导材料。由于超导材料承受的交流损耗是有限的，所以超导电机中应用的多是通过直流电的励磁线圈，而难以应用在电枢绕组上，一般设计为半超导电机。

3.3 超导电力推进系统

3.3.1 潜在特点

超导电力推进与普通电力推进以及齿轮机械推进相比具有突出的优点，主要有：

(1) 在直流系统中，以超导单极电机为动力的超导电力推进单轴推进功率可高达 200MW，克服了普通直流电机极限容量为 10MW 的局限性。

(2) 具有体积小、质量轻、效率高的特点。大容量超导电机与普通电机相比，在相同的质量、尺寸情况下可以输出多几倍的功率，推进系统的效率可提高几个百分点。

(3) 机舱布置灵活、自由，对原动机无特殊要求，选择余地更大。由于推进系统质量和体积的减少，以及设备配置的合理与灵活的布置，使大型集装箱船可以提高运输能力达 10%~20%。

(4) 系统可靠、生命力强、机动性好，便于集中控制和自动控制。

(5) 不仅比机械推进而且也比普通电力推进运行平静，噪声低，更好地解决了人们一直关注的大功率、高航速与低

噪声之间的矛盾。

(6) 船上的发电机组的电力还可以用于船舶推进器和必要时用作其他电气设备所需的电源。

应该指出上述的特点多以模拟研究得出的结果，另外，超导电力推进系统种类多，也比较复杂，并不一定每一特定的系统都具备上述所有的优点。

3.3.2 适用范围及主要组成设备

最为适合应用超导电力推进的船舶可有如下几种类型：

(1) 舱内推进装置安装空间狭小、轴系传递机构复杂的船舶。

(2) 要求推进功率大的船舶。

(3) 有效利用机械设备安装自由度，缩短主机室长度，增加武备、作战物资或其他货物的船舶。

(4) 过载力矩很大，操纵性要求很高的船舶。

(5) 不满载航行或巡航状态比较多的船舶。

(6) 要求安静型、低噪声或隐蔽性好的特殊船舶。

对于具体的船舶来讲，最有希望首先获得应用的有：驱逐舰、潜艇、小水线面双体船、水翼艇、表面效应船、气垫船、海洋控制船、护卫舰等特殊船型要求的高速型船舶；大型破冰船、油轮、集装箱船、游轮和航母等需要大功率输出，且对操纵性要求很高的容积型船舶。

超导电力推进的组成设备与普通电力推进相类似，主要包括超导电动机系统、超导发电机系统、配电系统、控制系统等，而最大差别是在于需要一套低温冷却系统：制冷机、冷却介质循环系统等。

3.3.3 推进方式与特征

超导电力推进与普通电力推进相似，具有多种方式，采用超导化以后的推进方式特征见表 5.5-1。

船舶超导电力推进方式采用交流、直流或混合系统，需从系统上和总体方面综合分析确定。就超导电机而言，无论是超导单极电机或是低速、多极超导交流电机，关键技术都不少，一些国家对超导交、直流电动机同时进行大量研究。在早期，主要重视发展超导直流电力推进系统，在 HTS 材料和电力电子技术已获迅速发展后，HTS 交流同步电动机得到更为广泛的重视，采用变频器的交流—交流推进方式得到人们的青睐。

3.3.4 低温冷却方案

3.3.4.1 配置低温超导电机的冷却方案

按蒸发氢气的处理方法不同对低温（液氢）冷却系统进行分类。大气放散方式，从节能角度考虑是不适用的；陆上液化方式，可减少船上设备，用于像渡轮那样航程短而且航线固定的船舶上；若要求节约能源同时又适用于长

表 5.5-1 各种电力推进方式的特征

推进方式	直流—直流	交流—直流 (晶闸管整流器)	交流—交流 (可变螺距)	交流—交流 (变频器)
原动机转速	一定	一定	一定	一定
电压	可变	一定	一定	一定
作电源用	不可	可以	可以	可以
后 退 ^①	电机磁场反向	用双层电桥转换	改变螺旋桨桨叶安装角	变频器输出倒相
实现超导化的问题要点	磁场反向 集电技术	阻尼屏高次谐波的吸收 集电技术	低速多极超导电机 大功率输出变距螺旋桨	阻尼屏高次谐波的吸收 低速多极超导电机

① 用转换主电路的方式除外。

期航行和航线不受限制的船上使用，一般采用在船上装备制冷机的方式。

3.3.4.2 配置高温超导电机的冷却方案

对于高温超导电机其励磁绕组，目前运行在 30~35K 左右，可采用液氮或冷氦气等冷媒用闭式循环冷却方式进行冷却。这两种方式的比较见表 5.5-2。

表 5.5-2 高温超导电机磁体两种冷却方案比较		
	冷氦气冷却	液氮冷却
冷却介质工作温度	范围宽（可设定为 20~30K 左右）	范围窄（1.1~30K 左右）
工作压力	大（~8×10 ⁵ Pa）	小（~1×10 ⁵ Pa）
冷却介质传输装置	复杂	较简单
制冷装置	有氦气泵	无氦气泵
冷却介质循环动力	来自氦气泵	来自热虹吸
磁体冷却方式	传导冷却	传导冷却
安全性	好	稍差
转子磁体冷却温度	在制冷量充足时，温度可以低一些，磁体性能指标可以相应提高	温度稍高，为 30~35K 左右
冷却介质价格	贵	很贵
国外应用情况	美国 5MW HTS 电机	韩国 75kW，德国 380kW HTS 电机

随着超导材料性能的提高，如果高场超导磁体可以运行在液氮温区，则采用取自空气中的氮气经液化而成的液氮来冷却，那么超导电机、超导电力推进系统的技术、经济指标将会进一步显著提高。

3.4 超导推进电机

3.4.1 低温超导直流单极电机

3.4.1.1 大功率电机主要潜在优点

超导单极推进电机的优点主要有：质量轻、体积小，低速电机功率密度有可能达到 0.7kW/kg，而高速电机则可能达到 3kW/kg；考虑低温设备损耗，电机的效率可能高达 98% 以上；电机单机极限功率为 200MW；电机的机械和电磁噪声都会是很小的。

3.4.1.2 基本的结构型式

(1) 固体电刷集电的超导单极电机主要有内圆筒式、外圆筒式、内圆盘式和外圆盘式。对于圆盘式电机，为提高电压，可将圆盘分割成彼此绝缘的扇形片，然后在圆盘内外径处安置电刷，并用适当方式进行电路上的串联连接；对于圆筒式电机，则用导条串联连接提高电机电压。图 5.5-13 是英国设计的破冰船圆筒式推进电机，容量为 50MW，电压 3000V，转速 100r/min，采用高场强磁体和转子用 32 根导条串联形成 3000V 的端电压。

(2) 液态金属集电的超导单极电机因集电装置位置不同和结构差异而有许多结构型式，从大的框架来讲，也离不开盘式、筒式等结构，但具体型式相差甚大，内磁体布置、多筒串联的液态金属集电超导单极电机以及在定子的固定圆盘与转子的旋转圆盘之间的间隙中全部灌满液态金属的多盘式液态金属集电超导单极电机是其典型的两种结构型式。

(3) 磁屏蔽的结构也是涉及电机结构的一个重要方面，设置一个或几个超导屏蔽线圈且都放在超导励磁线圈的外侧，同时以相反方向的电流励磁，就产生了与主磁场相反方

向的磁场。通过精确设计，使电机有效磁通的降低可以达到允许的程度，外磁场又能降低到可以接受的水平，从而降低电机整机质量。另外，利用超导体的完全抗磁性原理设置超导磁屏蔽层也是一个选择方案。

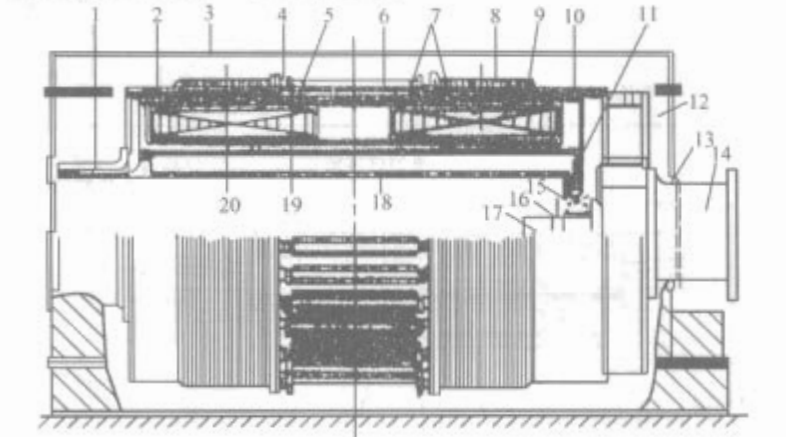


图 5.5-13 (英)50MW 超导单极电机设计示意图
1—固定端轴颈；2—励磁线圈；3—定子外壳；4—伸缩接头；5—液氮；6—电枢导体；7—环氧树脂；8—滑环；9—支撑圈；10—转子圆筒；11—隔板；12—冷却水通道；13—密封口；14—主动轴；15—低温；16—轴承和轴；17—封闭循环水；18—真空槽；19—支架管子；20—液氮槽

3.4.1.3 主要关键技术

电机结构、理论计算及主要电磁参数的选择；提高电压技术；大电流集电技术；超导磁体系统；适应调速的电机内外部电气连接方式与结构等。

3.4.2 高温超导交流同步电机

3.4.2.1 大功率电机主要潜在优点

提高功率密度，减小电机质量、体积以及占用空间大大缩小，一般仅有普通电机 1/2~1/3；在整个功率范围内都具有不变的高效率，尤其可贵的是在低速下，即使是 30% 额定航速（2.7% 功率），其效率也会超过 94%。还有很多优点，例如：电机定子采用空心结构，只有很低的同步阻抗；磁场线圈几乎是在恒定的温度下运行，不会产生热疲劳；电机电压几乎不含谐波；电机具有很低的噪声；维护简单，不需要通常的检查、返修或者重新绝缘等。

3.4.2.2 基本结构

低温超导电机与 HTS 电机结构的基本组成部分都相似，只是后者由于超导磁体采用的冷却介质温度为 30K 左右的液氮或冷氦气而不是温度为 4.2K 的液氦会带来某些影响，以及由于采用高温超导材料所引起的马鞍型超导磁体改变为跑道型超导磁体会带来某些影响等。图 5.5-14 是 HTS 同步电动机模型结构示意图。电机主要结构部件的特征和功能见表 5.5-3。

表 5.5-3 HTS 同步电机主要结构部件的特征和功能			
序号	结构部件	特 征	功 能
1	力矩管	低温和常温间过渡的圆筒体	减少由于力矩传递经轴而引起的热侵入
2	磁场绕组	超导磁体	产生高磁通密度
3	转子热屏蔽层	高真空多层绝热或设冷屏	辐射热屏蔽
4	转子电磁屏蔽层	低电阻圆筒体	电磁屏蔽和阻尼
5	电流引线	高温超导电流引线	集电环和超导磁场绕组间连接
6	低温传输装置	旋转与静止间的连接结构	制冷机和超导磁场绕组间冷却介质的传输

续表

序号	结构部件	特 征	功 能
7	真空层	$(10^{-2} \sim 10^{-3})$ Pa	真空绝热
8	电枢绕组	气隙电枢绕组	提高电机功率密度
9	定子铁心屏蔽层	迭片钢板	增大气隙磁通密度和电机外部磁屏蔽
10	励磁电源	恒电流电源	直流电供给超导磁场绕组

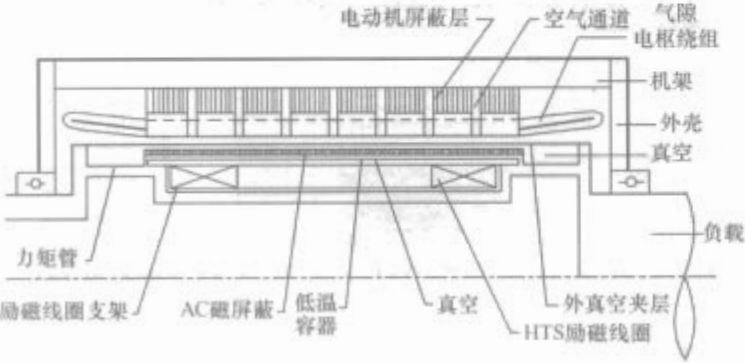


图 5.5-14 HTS 同步电机模型结构示意图

3.4.2.3 主要关键技术

HTS 电机是一项高新技术，具有多学科交叉技术的特点。涉及超导理论、深低温、高真空技术、流体力学、材料学、电磁理论，以及其他新技术、新工艺等。

(1) 高温超导电机总体设计计算研究：包括电机结构、三维磁场计算、电磁参数优化匹配、强度、传热、温升、振动噪声等理论计算，电机总体参数性能确定及电机运行过渡过程特性计算和相关的软件开发。

(2) 高温超导磁体系统研究：磁体电磁参数优化、绕制工艺、磁体结构形式；结合高温超导材料特性、磁体结构、运行温度、场强和励磁速度，确定磁体冷却方式、介质；低漏热电流引线研制；旋转状态下的保持低漏热和足够强度的特性；包括结构型式、材料构成、真空技术、热屏蔽特性，加工工艺等；对超导磁体的失超机理、判据、检测及保护进行研究。

(3) 电磁阻尼和屏蔽研究：为避免定子绕组交流电在转子超导磁体中感生涡流，必须对在超导磁体引起的交流损耗、电磁阻尼及运行安全的可靠性，设置电磁屏蔽的材料、尺寸、布置方位、作用及效果进行研究，也需要进行电机定子磁场对外界的影响和屏蔽的研究。

(4) 力矩管研究：要分析力矩管的受力情况及绝热要求，考虑温度变化、力矩传递、结构强度，采用试样研究试验探讨尺寸小、质量轻的力矩管材料、结构、制造工艺、安装特性等的问题。

(5) 冷媒传输与密封技术研究：超导磁体处于旋转状态的电机转子中，必须根据确定的冷却介质解决高效能、低漏热、紧凑型的冷媒传输装置结构及其与转子的配合，转子冷气旋转密封以及低温系统回收技术。

(6) 转子冷收缩补偿技术研究：超导电机转子的低温部位与常温部位温差达 280K，甚至更高，由于冷收缩的存在，会可能造成巨大的机械应力，因此必须设置冷收缩补偿装置和采取电机的径向冷收缩补偿措施，需要进行转子冷收缩补偿装置的材料、结构、安装方式的研究。

(7) 转子参数无线检测技术研究：主要研究内容是在旋转状态下，处于深低温、强磁场环境的温度、磁场、力场等的无线检测，探讨传感器、抗干扰措施、参数检测方式及线路优化。

(8) 空气隙电枢绕组技术研究：为提高电机的功率密

度，取消电枢的齿槽，让电枢绕组紧密排列成空气隙电枢绕组。研究内容主要包括绕组的结构、温升特性、安装和紧固方式以及由此而带来的材料、结构问题和空气隙电枢绕组内冷却方式、介质和传输系统。

(9) 船用条件适应性研究：超导磁体、内外转子构成的杜瓦容器及有关部件需要对船舶的倾斜、摇摆、冲击、振动、防霉、油盐雾的适应性进行研究。

3.5 船舶超导电力推进系统方案设计示例

本节所讨论的超导电力推进系统都是指低温超导的交流、直流电力推进方案设想，并以理论的技术参数估算的。近期迅速发展的高温超导电机所组成的高温超导电力推进系统，可望比这些系统有更高的技术、经济性能指标。

3.5.1 液化天然气破冰船超导直流电力推进系统方案

日本对一艘三轴系的 125 000m³ 液化天然气破冰船的推进系统，就普通电力推进和超导电力推进进行方案设计。其主要设备的项目列于表 5.5-4 中。考虑到部分负载时能有较高的效率，设想在一根轴上串联配置两台电动机，对于普通电动机，考虑到起动力矩特性、制造功率极限，选用晶闸管控制电动机。在超导电力推进系统中，考虑采用变螺距螺旋桨。

超导与普通电力推进系统的主要推进设备的质量与占地面积的比较表明，采用超导方案，电力推进系统质量减轻 70%（约 2250t），占地面积缩小 65%（约 960m²）。若将两种机舱配置在船上布置，则机舱长度可缩短 13.5m，船体尾部亦可变狭小许多。

表 5.5-4 液化天然气破冰船推进设备主要项目比较

项 目		普通电力推进系统	超导电力推进系统
对象船	船 种	125 000m ³ 液化天然气破冰船	
	轴数×螺旋桨形式	3×定距桨	3×变距桨
推进发电机 台数×形式 容量(kW)×转速(r/min)		6×交流同步发电机 25 000×3600	6×超导直流 单极发电机 23 500×3600
驱动发电机的原动机 台数×形式 输出(MW)		6×燃气透平 26.2	6×燃气透平 24.1
推进电动机 台数×形式 容量(kW)×转速(r/min)		6×晶闸管电动机 22 100×133	6×超导直流 单极电动机 22 100×133
配电盘台数		6	6
晶闸管盘台数		6	—
推进电动机励磁控制盘台数		6	6
推进发电机励磁控制盘台数		—	6
液体电阻器台数		6	6
氮制冷/液化机 台数×容量(L/h)		—	12×10
氮压缩机台数 容量(m ³ /h)×表压力(MPa)		—	6 160×1.62
氮气回收装置		—	1套

3.5.2 直流超导电力推进试验船

英国曾研制一套由 1000kW 超导单极发电机和超导单极电动机组成的推进系统在试验船上进行试验。美国曾将 300kW 超导直流电力推进系统和 2200kW 超导单极发电机

与电动机组成的超导电力推进系统，前后分别在试验船上进行示范表演并获成功。图 5.5-15 是 300kW 发电机和液态金属集电超导电动机及系统在试验船上的布置图。

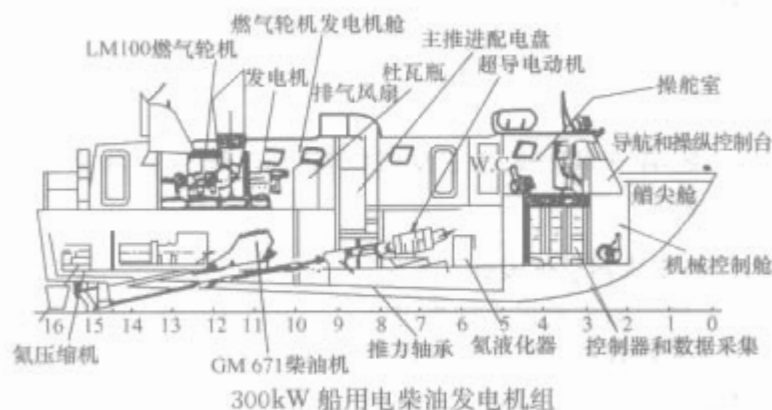


图 5.5-15 试验船低温超导直流电力推进装置布置图

3.5.3 小水线面双体船、水翼艇等的超导交流电力推进系统方案

国外有学者对所需要的一定排水量的小水线面双体船、水翼艇、表面效应船（气垫船）、海洋控制船和护卫舰等特种船舶，就超导交流电力推进方案与普通的机械推进方案进行详细比较，结果如表 5.5-5 所示。表中所示的超导电力推进系统是指包括发电机、电动机、开关设备、控制装置、低温设备和电缆等组成的超导电力传动系统。

表 5.5-5 超导交流电力推进系统比较

舰船种类	排水量 (t)	推进功率 (MW)	航速 (kn)	传动装置质量比	
				常规系统	超导电力 推进系统
小水线面 双体船	4300	2×22	30	1.0	0.64~0.72
水翼艇	750	2×15.4	50	1.0	0.9~0.95
表面效应船 (气垫船)	2000	推进 2×36.8 浮升 2×8.1	—	1.0	0.78~0.91
海洋控制船	12 000	29.4	22	1.0	0.63~0.765
护卫舰	4000	25.7	30	1.0	0.52~0.70

3.6 超导综合全电力推进

超导电力推进装置最重要的也已接近实用化的产品是直接针对船舶使用的超导推进电机。此外，还有一些超导电器等产品可望在未来综合全电力推进及船舶电站上得以应用。尤其是某些项目，已经在陆地电力系统中的超导应用研究取得突破，有的已经实用化，将来可以延伸到船上得以应用。

为此，美国在未来舰船的综合全电力推进系统计划中，为适应于超导电力推进的发电机——电动机系统以及高能激光武器的发展，于 2003 年开始了一个全尺寸的高温超导技术舰船应用项目，以期在下一代舰船上建立起以下高温超导系统：推进电动机，25~30MW，100~200r/min；推进发电机，25~30MW，3600r/min；武器用能源发电机，3~5MW，3600r/min；武器用磁场储能装置，400MJ，150MW。2000 年，美国成立专门的研究中心开展未来全电力战舰中超导电机、超导储能、超导电缆、超导变压器和限流器综合应用前沿技术探索。英国表明未来综合电力舰船推进系统和发电机的发展趋势是采用永磁和超导技术。德国提出含有超导发电机、电动机、变压器和限流器等的全超导船舶的设想。

4 船舶磁流体电力推进装置

4.1 推进原理与主要潜在特点

4.1.1 基本原理

船舶磁流体动力（MHD）推进原理是：在船上设置的电源经过海水接通电极产生电场，同时在船上设置一磁体形成强磁场，根据电场与磁场相互作用产生电磁力（即洛伦兹力）的原理，海水将受到该力的作用向船后运动，其反作用力将使船舶推向前进。

假设在海水中通过的电流密度为 J ，存在的磁通密度为 B ，那么由费莱明（Flemin）左手法则定出电磁力的方向，而产生在单位体积海水中的洛伦兹力则为

$$F = J \times B \quad (5.5-1)$$

由上式可知，要产生很大的电磁推进力就必须提高电流密度和磁通密度并且使它们形成正交。一般的铜材线圈或永磁体形成强磁场是十分有限的，只有超导技术的采用才有可能实现。因此，船舶的 MHD 推进技术实际上主要就是指超导 MHD 推进技术。通常把采用这种技术的船舶称为超导 MHD 推进船或简称超导船。

根据 MHD 推进器工作区域理论模型，当在工作区域海水中垂直地形成一个磁场，与该磁场正交的方向上水平地流过均匀电流，则产生电磁力 F (N)

$$F = JBlab \quad (5.5-2)$$

式中： J 为电流密度，A/m²； B 为磁通密度，T/m²； l 为工作区域长度（电极长度），m； a 为工作区域高度（电极宽度），m； b 为工作区域宽度（电极间距），m。

用 η_T 表示电磁力转换为推力的效率，则推力 T (N) 可表示为

$$T = \eta_T \Sigma F = \eta_T NnJBlab \quad (5.5-3)$$

式中： N 为推进器数量； n 为每一个推进器的管道数量。

4.1.2 主要潜在特点

超导 MHD 推进与传统的机械类推进相比具有明显优势，其主要的潜在特点是：

(1) 以电磁力作为推力，无需配备螺旋桨、齿轮传动机构和轴系，所以是一种完全静止的推进器机构，振动和噪声都很小。

(2) 船舶推力的大小和方向与海水通电的大小和方向紧密相关，通过控制海水通电就能够很方便地改变航速和航行的前进与后退。

(3) 船体外部没有像螺旋桨那样的凸出部件，船体外形可以很流畅、结构简单。

(4) 没有转动机构，没有螺旋桨，就不会有桨叶上产生空泡所带来的推进效率下降、桨叶或流道的空泡剥蚀损伤等的恶果，也没有尾部密封问题。

(5) 产生的磁场和电场均是静止的，没有机械运动部件，也就不受功率和航速的限制。因此，可以采用大功率的主机，制造大功率、高航速船舶。

(6) 没有机械轴系，设备安装灵活，能有效利用舱室空间，船体设计更自由。

(7) 在超导磁体内储有巨大的能量，在紧急情况下可提供作备用电源。

4.2 推进型式和船舶总体组成

4.2.1 推进型式

MHD 推进有四种型式，按产生磁场所需的励磁电流类

型不同,可有直流磁场型和交流磁场型;按磁场布置的位置不同,可有在船体外部形成磁场的外磁式和在船体内部设置管道并在管道内形成磁场的内磁式。由于交流损耗的问题,目前超导材料还无法在交流电强磁场的状态下工作,只能选择直流电励磁。为此,直流内磁式和直流外磁式将成为主要的两种型式。从目前的技术水平和研究目标来看直流内磁式更适合一些,尤其是漏磁少的特点吸引人。

4.2.2 船舶系统的主要构成

由超导 MHD 推进器组成的超导船,一般有如下的几个主要组成部分:

(1) 船体系统:船体、航海仪表、锚、链及系船装置、起居设备、救生设备等一般船舶所具有的设置。

(2) 推进系统:原动机、发电机、超导磁体、海水通电电极、蓄电装置、推进控制装置等。

(3) 制冷系统:制冷机、压缩机、纯化装置、低温容器,液氮及液氮冷却介质的传输系统、低温介质储槽等。

(4) 船上辅助机械、电气设备、灯光照明等的辅助电源设备。

为了减小船舶负载和占用空间,有些超导低温的辅助设备可以考虑装在岸上,如闭合运行磁体的充电电源,一部分的冷却介质的存储、回收及传输设备和首次对磁体预冷所需的大容量制冷机等。

4.2.3 超导 MHD 推进系统的主要构成

4.2.3.1 原动机

原动机类型有船用燃气轮机、船用柴油机、矿物燃料汽轮机、核动力汽轮机、燃料电池等。为了将燃料转换为机械能或电能,原动机的选择及其组合是十分重要的,燃料效率、投资成本以及尺寸、质量是选择的主要指标。燃料电池应是未来的优化选择目标,它将取消原动机和发电机。

4.2.3.2 发电机

配置高速原动机和发电机以减小尺寸、质量,提高功率密度。MHD 推进器对电源的需求是十万安培以上电流、数百伏电压、具有极低纹波系数的低压大电流电源。可以采用超导单极电机,也可以采用多相整流式交流发电机。

4.2.3.3 输电系统与开关设备

MHD 推进器需要非常大的电流,电力传输要考虑效率、质量、体积、费用、电磁干扰等因素,近期采用液体冷却的同轴汇流排,未来采用高温超导电缆也是可能的。需要有满足对发电机的开断或反向的大电流开关,国外曾设计同轴开关容量达 100kA。

4.2.3.4 辅助系统

(1) 低温冷却系统是主要的辅助系统,它由 MHD 推进器的超导磁体自身要求所决定的,也跟磁体冷却时间、真空漏热情况、失超回收和可靠性因素等有关。如果磁体采用可拔式电流引线,则会减少低温热负荷。如果未来采用高温超导磁体,则低温制冷系统将大大简化。

(2) 励磁系统包括 MHD 推进器的超导磁体和发电机的励磁系统。后者比较小,主要是磁体的励磁。对于大型船舶最好的办法是尽可能利用其中一台推进发电机兼作励磁电源。

(3) 冷却系统包括热交换器、泵、管道、阀门等部件,其尺寸、质量主要受推进系统的效率所决定。冷却液体宜采用淡水或去离子水。

(4) 其他的辅助设备:与原动机有关的润滑、通风、燃油系统,以及整套的控制系统等。这些对能源的消耗和所占

有的费用也是值得注意的。

4.2.3.5 其他

海水通电电极是超导 MHD 推进所需要的独特的部件,最主要的要求是不应造成海洋污染、腐蚀轻微、使用寿命长。另外,为可靠性起见,必要时可设置蓄电装置作为应急电源。

4.3 超导 MHD 推进主要关键技术与超导船总体设计概要

4.3.1 推进器总体设计

一艘大船需要很大的推进动力,可以采用多个推进器以减少其单机容量,每一个推进器采用多个磁体线圈排列成莲花状的环形结构,如图 5.5-16 所示。通过这样排列,不但推进器外漏磁场大为减少,线圈磁通叠加后会形成更强的中心磁场,而且作用在线圈中的电磁力是一个向心力,其结构容易处于稳定状态,工作可靠。

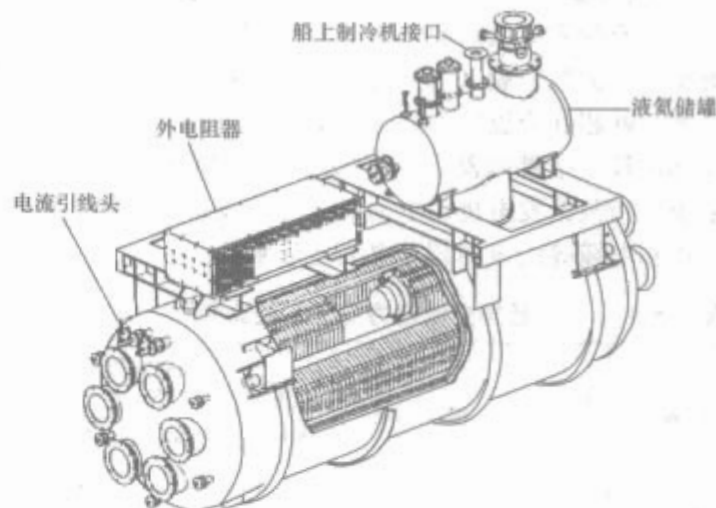


图 5.5-16 超导 MHD 推进器简图

推进器的优化设计除了与船身的紧密配合以外涉及许多磁流体动力学问题,对于管道横截面形状、管壁摩擦情况(包括由电解产生的气体及磁场对它的影响)、电磁力对其压力的影响、电磁力效率等基础研究试验将是必要的。为了最大限度提高推进效率和使水动力损失减到最小,推进器设计需尽量满足:使海水进口流速增到最大值、使纵向流体排出无阻碍、使对吃水和船宽的影响减到最小、使矢量推力性能增到最大等。

直管式通道的 MHD 推进器结构可以是多样的,如鼠笼式 MHD 推进器、线性 MHD 推进器、环状式 MHD 推进器、双层磁体线圈 MHD 推进器等。很多情况下 MHD 推进器是考虑与船体呈一体化的结构,这也是 MHD 推进船的一个特点。图 5.5-17 是潜艇环状超导 MHD 推进系统一体化示意图,艇的后部可以安装许多设备。

4.3.2 超导磁体系统

超导磁体系统包括超导磁体、低温容器及其附件,它是

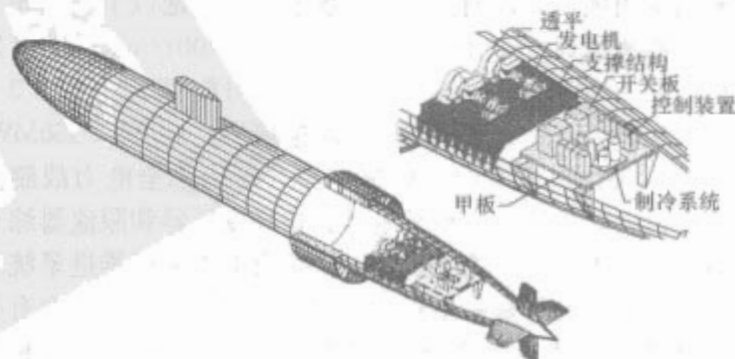


图 5.5-17 潜艇环状超导 MHD 推进系统一体化示意图

超导船最重要的部件之一，也是体现超导船运行特征和可靠性的决定性因素。

4.3.2.1 超导磁体

对超导磁体的基本要求是工作稳定、能产生很强的磁场强度、磁通分布均匀且与管道垂直、结构紧凑可靠。尽管高温超导材料制作的磁体很有发展前景，但是目前还有困难，Nb₃Sn 低温超导磁体是可行的，不过工艺性较差，此前已经制作的 MHD 超导磁体多采用工艺性更好的 NbTi 低温超导线。

对于直管式通道的磁体类型，一般为马鞍型磁体、跑道型磁体等。磁体的形状与管道形状紧密相关，它要根据磁场强度要求和预先计算的电磁力分布用有限元法计算确定，按磁场均匀性好、线圈中最大磁场强度与平均值接近的原则确定磁体线圈的支持形状、结构布置及线圈的匝数。低温超导磁体的冷却一般采用 4.2K 温度的液氮浸泡方式，也有采用更低温度，例如 1.8K 温度冷却。磁体结构件、支撑装置采用高强度复合材料、铝合金等，在减轻质量的同时，保证有足够的强度。

另一种磁体是螺管式超导磁体，与之相配的管道是螺旋管道式，如图 5.5-18 所示。其中，主要的过程都发生在同轴的两个电极之间形成的绝缘壁面螺旋管道中，管道入口处用了导向叶轮，使轴向流动的海水转变为螺旋式流动，而在出口处用一个校正叶轮将海水螺旋流动变成轴向流动，形成轴向推力。根据计算，这种型式比直管式超导 MHD 具有更佳的特性。

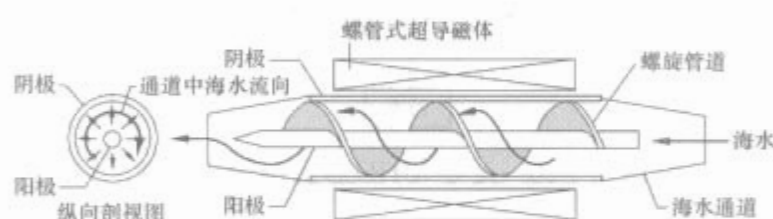


图 5.5-18 螺管磁体螺旋管道超导 MHD 推进示意图

4.3.2.2 低温容器

低温容器的特点是：内胆盛满液氮并存储低温超导磁体，以维持超导磁体始终处于零电阻的超导状态下；在内外胆之间至少保持 10^{-3} Pa 真空度和设置良好的绝热层以防止漏热和减少液氮的蒸发；低温容器夹层之间利用液氮或冷氮气设置热屏蔽层以进一步减少从周围高温环境直接向深低温区传入热量；适应于船用条件下的冲击、振动的影响，具有轻质、不导磁、高强度的特性，使用铝合金、复合材料、不锈钢等材质；应具有适合于 MHD 推进的要求且与船体紧密结合的异型低温容器结构；各部件尺寸结构要采用有限元计算的结果来确定，要考虑正常情况和失超情况下的电磁力作用的影响，以及失超时磁场迅速发生变化在低温容器内产生涡流的影响；在低温容器上方还应该设置一定容积的液氮储罐，以备内胆内由于漏热蒸发而进行液氮补充。

4.3.2.3 关于磁屏蔽

磁屏蔽课题与低温容器的结构及材料紧密相关的，也与磁体的设计有关。

超导磁体的设计必须保证在管道中形成强磁场，在不形成电磁力的位置应使之磁场减弱，然后对其难以避免的漏磁场进行屏蔽。利用自由电子模型和光束电子模型对磁屏蔽分析显示，由玻璃纤维增强塑料层和 2mm 厚度的铁—镍基合金非晶薄膜构成的薄壁结构对磁屏蔽有效，它使船舶 MHD 推进用低温容器的磁屏蔽重量大幅度减轻，而且还同时起了绝热作用和结构元件作用。

国外正在开发可浇注的轻量聚合凝结物磁屏蔽，用它可浇注成任何尺寸形状、质轻、机械强度大、不透水并具有磁屏蔽性能的部件。它比铸铁、钢有更好的减震特性，在电磁屏蔽应用中具有足够的导电能力。另外的一种设想，考虑超导体所具有的完全抗磁性，可以利用超导薄膜（或板材）的这种迈斯纳（Meissner）效应进行磁屏蔽，这种薄膜（或板材）的层数越多屏蔽效果就会越好。

4.3.3 低温制冷系统

低温超导磁体浸泡在 4.2K 的液氮中工作，才具有超导电性。超导磁体的预冷和第一次灌装液氮，可以考虑利用岸上的大型氮液化装置生产的液氮来解决。但在航行中，环境的外部热量会通过传导、辐射、对流等形式浸入超导磁体，而且磁体连接接头等部位也会产生一些热量，使得液氮蒸发成氮气，为此，需要船上的低温制冷设备生产的液氮给予补充。另外，低温容器上方具有一定容积的液氮储罐也是作为液氮补充的储备而设置的，制冷机就安装在它的上方。考虑到冷氮气的再回收等因素，船上的低温制冷系统应包括氮气压缩机、制冷机、氮存储器及预冷和冷屏用的液氮系统等。

作为船用的低温制冷系统，必须具备体积小、可靠性高、操作方便等特性，至于哪一些设备可以安装在船上或陆地上最终必须从船舶总体功能和系统需求角度出发进行优化。图 5.5-19 是部分低温设备设置在陆地上的超导船 MHD 推进器系统框图示例。

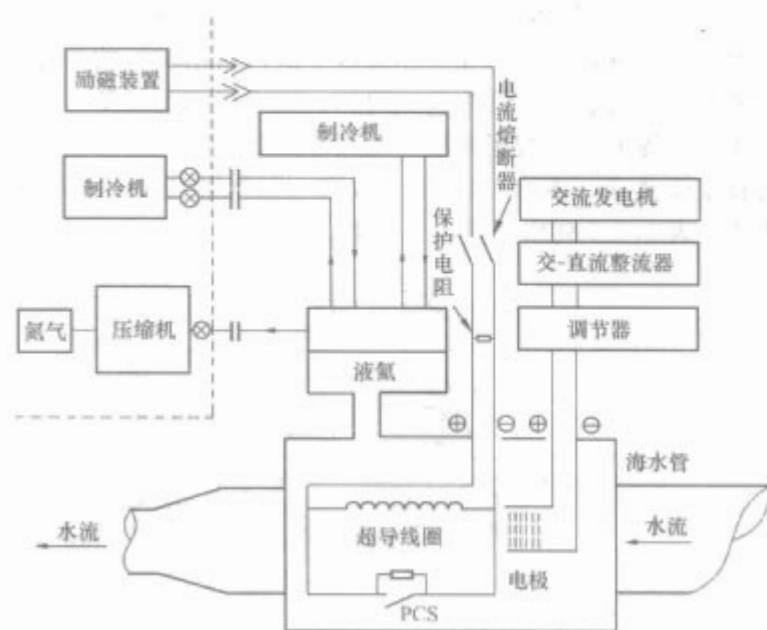


图 5.5-19 超导船 MHD 推进器系统框图示例

4.3.4 海水通电电极

要使直流电通过 MHD 推进器管道中的海水，使用的电极的材料至少必须具备两个条件：①海水电解的生成物不应造成海洋污染；②电极板表面的电化学腐蚀轻微、使用寿命长。目前采用镀铂的钛作为电极材料较为合适，其耐腐蚀性比其他一般使用的电极为好。而且在可允许的电流密度下，其电解气泡直径可下降到 10mm 以下，不构成产生航迹的威胁，增加其隐蔽性。

海水的电导率将影响海水通电，曾经研究使用添加离子的办法使海水导电性增强，以此提高内磁式 MHD 推进装置的效率。添加离子的办法之一是在管道中加入各种各样浓度的硫酸混合物。它也有助于在淡水河流与港口等低电导率区域 MHD 推进装置的运行操作。当然，这样做的代价是十分昂贵的，不过有人已在探讨在推进器出口处回收这些物质的可能性。

4.3.5 推进用电力系统

当大型氮液化装置及相关设备安装岸上的情况下，船舶推进用电力由两个供电系统组成，其中一个供电系统给设置在海水管道中的电极提供直流电，而另一个供电系统则给船上各种辅助推进系统提供电源，其中包括船上供电系统、推力控制系统及监控与测量系统。为了维持连续供电，给推进系统、液氮制冷设备等使用的主要控制电路可配备交、直流双重供电系统。蓄电池组是其备用电源，以便在交流供电系统发生故障时通过控制板由蓄电池组供给直流电。

4.3.6 超导 MHD 推进船设计概要

首先选择对船舶最合适的 MHD 推进装置类型，并选择（或初步设计）船形。其次是要按照船速和推力的要求来确定磁场和电场的分布图形、设计超导磁体和电极。在设计低温容器和电源系统之前，详细地计算推进特性，并对照船舶规范进行校验。最后再根据船舶设计来检查系统的总布置情况。设计过程如图 5.5-20 所示框图。

4.4 超导 MHD 推进潜在应用示例

超导 MHD 推进的应用，在技术上尚未成熟，仍然处于探索阶段。无论是实验室的关键技术与基础研究、试验船的试制和潜在应用船只的概念设计都将有助于该项技术的实用化进程。

4.4.1 “大和一号”（日）超导 MHD 推进试验船

“大和一号”超导船是为了实现把超导 MHD 推进装置作为船舶推进器，并能在实际海域中进行自由航行的实船而建造的。尽管它是一艘小型试验船、技术指标也较低，但是它还是世界上第一艘超导船，对超导 MHD 推进走向实用化具有重要意义。图 5.5-21 是“大和一号”超导船的总体布置图。表 5.5-6 列出了其主要参数。

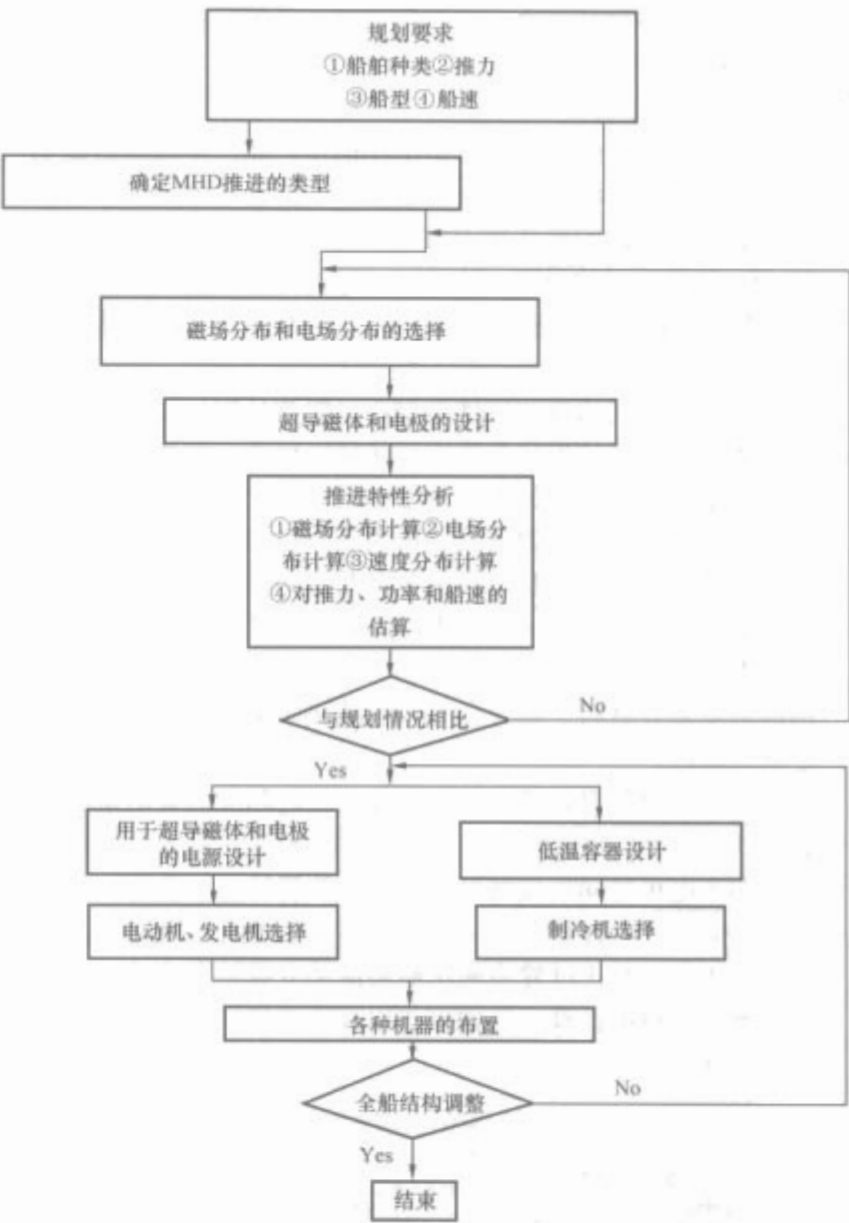


图 5.5-20 超导 MHD 推进船设计框图

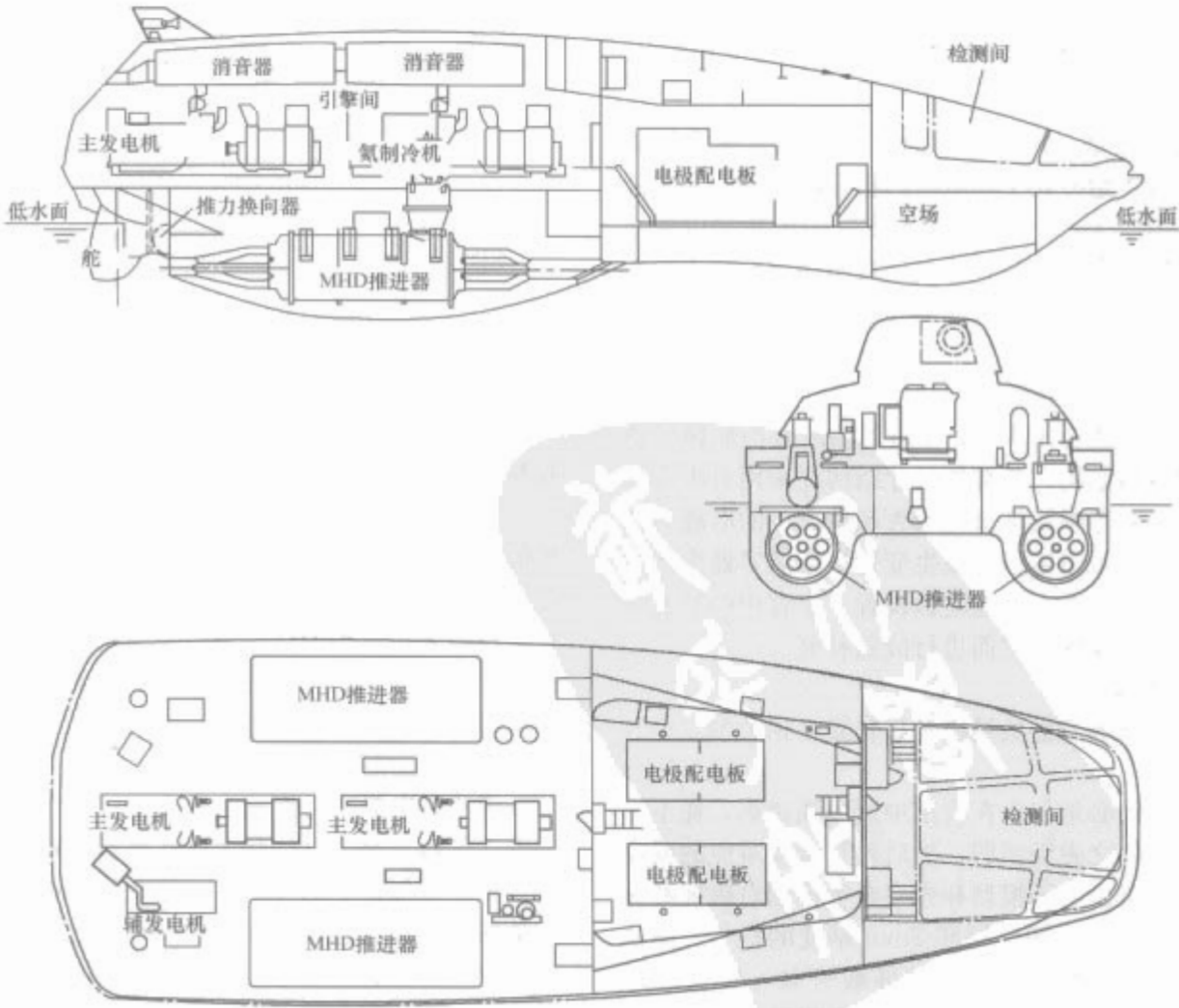


图 5.5-21 “大和一号”超导船总体布置图

表 5.5-6 “大和一号” 超导船主要参数

项 目	参 数
总长 (m)	30.00
型宽 (m)	10.39
吃水 (m)	2.69
标称排水量 (t)	185
航行海区	静水区域
设计航速 (kn)	约 8
推进器形式	6 连环内磁式×2 只
输出洛伦兹力 (kN)	总计约 16
通电功率 (kW)	约 3600
船上制冷装置	
冷制机	涡轮膨胀制冷式×2 台
氮压缩机	油压螺旋式×1 台
主发电机 (kW)	2000×2 台
辅助发电机 (kW)	180×1 台
定 员	
乘务员	3 名
其 他	7 名

4.4.2 潜艇超导 MHD 推进方案

在军用潜艇设计中，隐蔽性是必须考虑的重要因素，这就需要在技术上限制磁场泄漏，以减小船舶的外磁场，这一限制，排除了采用磁场暴露在船体外面的外磁式结构。对于 MHD 推进器的圆筒形管道几何形状，为了增强船舶的操纵性和生存能力，可以在同一推进装置上装多个 MHD 推进器，这种组合可提供最大的推进效率和最小的磁场泄漏，把磁体分段地安装在环形结构中，与船体更贴切，船形更流畅，体现更好的推进特性。如果某一分推进器损坏，还可保持潜艇“受伤”战斗的能力。单独控制各个分推进器就能改变船舶的操纵性。美国曾经根据这种推进器的特点提出一种潜艇的设计方案（见图 5.5-17），其性能参数见表 5.5-7。

表 5.5-7 （美）环形超导 MHD 推进潜艇性能参数

基本参数：	
海水电导率 σ (S/m)	4.5
电场强度 E (kV/m)	1
磁通密度 B (T)	15
潜艇长度 L (m)	100
阻尼系数 C	0.001
海水密度 ρ (kg/m ³)	1024
磁体串联级数 N	3
潜艇性能：	
输入功率密度 P (kW/m ³)	2370
效率 η (%)	47.4
推进器功率密度 PT (kW/m ³)	1120
船速 v (kn)	61.4
喷口速度 v_T (kn)	67.8
电流密度 J (A/m ²)	2370
推力密度 F (kN/m ³)	35.5
潜艇直径 D (m)	10
超导线圈质量 W (t)	150
潜艇排水量 Q (t)	5630
推进器内半径 r_1 (m)	4
推进器外半径 r_2 (m)	5
推进器截面积 A (m ²)	22.6
推进器长度 L_1 (m)	3
总表面积 S (m ²)	4710
推进器有效体积 V_1 (m ³)	67.9
总推力 F_1 (kN)	2410
推进器功率 P_{11} (MW)	76
总输入功率 P_1 (MW)	161

4.4.3 破冰船超导 MHD 推进方案

破冰船要求其推进装置具有最大的输出功率和最小的推进阻力，而在破冰时要求产生 2~3 倍的额定输出推力。为此，外磁式的超导 MHD 破冰船的推进方式可能最符合这些要求。对于破冰船超导 MHD 推进除了一般的优点之外，还具有如下优点：没有容易受冰损害的螺旋桨和舵；在系泊状态下能获得最大的推力；氢气泡的存在将减小船体与冰的摩擦；焦耳热的损耗使海水受热。因此，对于破冰船来讲，采用 MHD 推进方式是十分合适的。

4.4.4 其他船型的超导 MHD 推进方案

图 5.5-22 是一艘装有 U 型管道式的超导 MHD 推进器的单体水面船的示例。推进器设置在平行船体的前端，以便顺畅地吸入高压水流以及能顺畅地纵向排出水流，把对船舶吃水的影响减到最小值，并可降低推进器形状和安装位置引起的兴波影响。

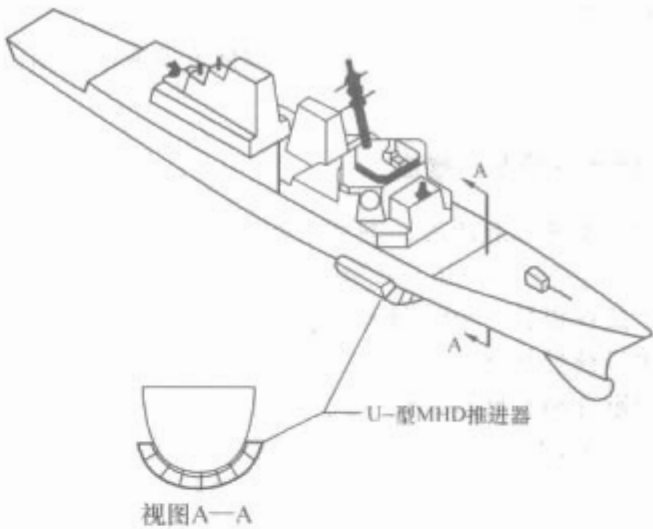


图 5.5-22 装有超导 MHD 推进器的单体船型示例

图 5.5-23 是在每个水下船体艏部附近装有一个椭圆管道式 MHD 推进器的小水线面双体船的示例。从水动力性能的角度看，超导 MHD 推进器装在这一位置是合适的，它可使进口的流速最大，从而可得到最有效的能量转换。

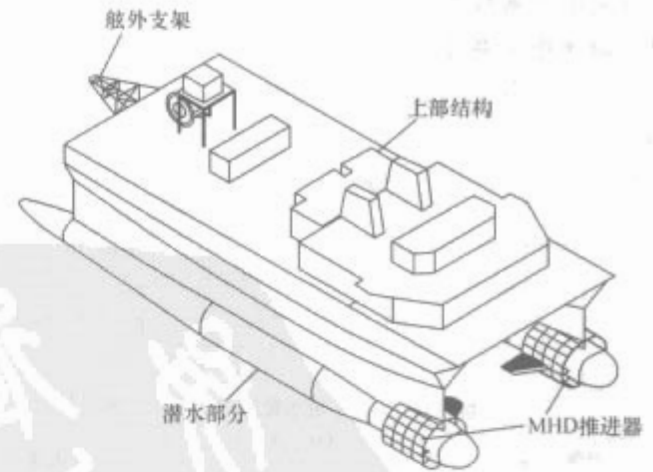


图 5.5-23 装有超导 MHD 推进器的小水线面双体船示例

同样，超导 MHD 推进装置也可以用于客轮、旅游船等诸多民用船。

4.5 超导 MHD 推进技术发展的历程及前景

开展超导 MHD 推进技术研究，日本、美国、俄罗斯处于世界领先水平。此外，还有一些国家，如德国、意大利、韩国、南斯拉夫等有研究小组或学者从事该项研究的基础工作、理论计算、模型试验等。我国曾进行过 MHD 推进的理

论计算、基础研究和模型试验,也曾进行超导 MHD 推进的研究和完成实验船的海水水池航行试验以及有关舰船的方案设计。

船舶超导 MHD 推进还没有达到实用化程度,一些关键技术还要进一步解决,一些技术指标需要提高。随着基础研究的深入开展,理论研究计算的加强,结构型式的改进,一些新材料、新工艺的出现和应用,尤其是高温超导材料及磁体技术进一步开发,未来能在高温下进而在液氮温度下实现 20T 甚至更高的强磁场时,低温制冷问题将大大简化,超导 MHD 推进装置各项技术指标将得到全面提高。超导船实际应用的前景是光明的。

5 船舶的喷泵和泵喷推进装置

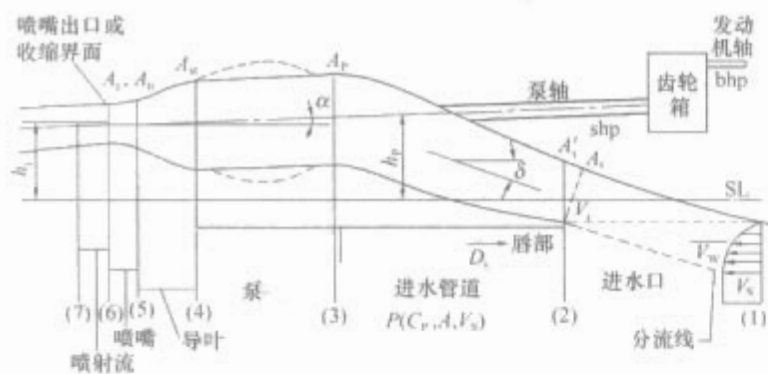
喷泵和泵喷是两种不同类型的推进器。喷泵是喷水推进器(waterjet)的俗称。喷水推进器通常为混流泵或轴流泵,它是利用喷水的反作用力产生推进,故俗称“喷泵”。泵喷是 pumpjet 的英译名,泵喷推进中的推进器通常为渐扩型导管螺旋桨。

5.1 喷水(喷泵)推进

喷水推进的起源可回溯到 1661 年的一项专利,它比螺旋桨早诞生 19 年。由于早期的喷水推进的推进效率低于螺旋桨,故在很长一个时期里它不如螺旋桨应用这么普遍。喷水推进系统经历了以下演变:最早的喷射推进,液压泵推进,间歇性喷水推进,底板式、舰板式、外挂式喷水推进。近几十年来,由于喷水推进理论和实验领域的快速进步和研发领域诸多工程新技术的应用(如 CAD 和 CFD),喷水推进效率高速时已超过螺旋桨推进,民用高性能舰船上喷水推进的应用已超过螺旋桨。国外先进海军战斗舰艇也开始采用喷水推进技术,如美国海军研究局 2005 年进行试验的先进电力推进演示舰“Sea Jet”(海箭),安装了 Rolls-Royce 海军产品部研发的水下喷水的先进喷水推进器(AWJ-21),该演示舰是美海军 DDX 项目的组成部分。另外,2005 年初下水的美国滨海战斗舰(Littoral combat ship)的演示舰 X-Craft 也采用了常规喷水推进系统。

5.1.1 喷水推进基本原理

图 5.5-24 为喷水推进器定义简图。



(3) 水泵叶轮拆卸和检修较螺旋桨复杂。

(4) 最大单泵功率没有螺旋桨大。尽管目前喷水推进器最大单泵功率已达到 $3.7 \times 10^4 \text{ kW}$ (5 万马力) 以上了,但在大型和超大型船舶上仍不足以提供足够的推力。如果采用多组喷泵来提供足够推力,因需要的喷泵数太多而超出设计范围,也大大增加了采购费用。

(5) 装置价格高。

5.1.3 喷水推进技术在世界海军的应用

5.1.3.1 高速攻击艇

高速攻击艇采用喷水推进具备了优异的机动性和操纵性,解决了高速时的空泡汽蚀问题,同时还提高了推进效率。航速越高,喷水推进器的来流的冲压越大,叶轮的空泡裕度越大,使推进器可以在较高的转速下工作,从而使推进器尺寸减小以减轻质量,还可减小齿轮箱的减速比而采用体积更小、质量更轻的齿轮箱,在某些舰艇上甚至不需要安装减速齿轮箱,而采用原动机直接驱动喷水推进器这一配置方式。表 5.5-8 列举了近十年来国外海军喷水推进导弹艇的一些例子。

表 5.5-8 国外喷水推进导弹艇

船级	Hayabusa	Fearless	Sparviero	Hamina	Goteborg
国籍	日本	新加坡	日本	芬兰	瑞典
船形	单体	单体	水翼艇	单体	单体
排水量(t)	200	500	50	270	399
发动机类型	燃气轮机	柴油机	燃气轮机	柴油机	柴油机
推进器厂商	MHI	KaMeWa		Lips	KaMeWa
最大航速(kn)	44	20	46	32	30

5.1.3.2 隐声舰艇

传统的螺旋桨推进是舰艇的主要噪声源之一。采用喷水推进对于抑制空泡、降低舰艇的声学信号具有很好效果。在高航速时,喷水推进的噪声要比传统的螺旋桨推进低 10dB 左右。

瑞典海军的维斯比 (Visby) 级轻型护卫舰,是新一代全隐身舰艇,全面的隐身技术当然也包括了采用喷水推进技术以大幅减小水下噪声。该型舰建造五艘,前四艘用于猎雷和反潜,第五艘用于对舰和对陆作战。首舰已于 2000 年 5 月下水,2007 年将全部服役于瑞典海军部队。该型舰的动力装置采用了柴燃联合动力装置,每舰配备四台 TF50A 型燃气轮机,每台功率 4000kW;两台 MTU16V2000TN90 型柴油机,每台功率 1300kW;推进系统为两套 KaMe-Wa125SII 型喷水推进装置。高航速时,每两台燃气轮机驱动一台喷水推进器工作,航速可达 35 节;中低航速时,每台柴油机驱动一台喷水推进器工作,航速为 17 节左右,适合于执行猎雷和反潜任务。

挪威盾牌 (Skjold) 级隐身导弹艇。该级艇与法国拉菲特级和瑞典维斯比级同属于全隐身战舰,船形为气垫双体船,采用了喷水推进,具有良好的机动性和高速性能。该艇以速度高、隐身性好、体积小但武器装备量大且擅长滨海作战而著称。

5.1.3.3 高速运输舰

澳大利亚 Incat 公司的采用喷水推进的穿浪双体船,该舰接近 45 节的高航速具有优良的机动性和操纵性,美国海军接二连三的租用和改装了澳大利亚的两艘穿浪船和一艘高速双体船用于试验和性能评估,目前美国海军也正在研究和

开发此类高速舰艇,用于兵力的快速部署和海上支援。

美国海军租用的 HSV-2 号双体穿浪船,该船长 97.22m,宽 26.6m,吃水 3.43m,满载排水量 1800t,载重 680t;四套动力装置对称分布在两个片体内,每套动力装置由一台功率为 7200kW 的 Caterpillar3618 柴油机驱动 LIPS 公司的 LJ120E 型喷水推进器,最高航速可达 45 节。

5.1.3.4 护卫舰和驱逐舰等大中型舰艇

美国海军 DD (X) 系列舰艇将是 21 世纪上半叶美国海军水面作战舰艇的中坚力量。其中滨海战斗舰主要用于执行滨海军事任务,速度和机动性构成了滨海战斗舰的关键要素。设计者 Lockheed Martin 公司采用 CODAG 形式的柴燃联合动力装置驱动四台 KaMeWa 153SII 型喷水推进器。四台喷水推进器中有两台装有转向和倒车装置,另两台是助推器,没有装转向和倒车装置,用于加速和高速过程。该船长 115.2m,排水量 2800t,两台燃气轮机提供的动力在 2min 内可将船速从零加速到 46 节,最高航速可达 60 节。在全航速时,该船可在 8 倍船长范围内进行 360° 回转,具有良好的机动性。

美国海军测试罗尔斯-罗伊斯公司的船用 AWJ-21TM 喷水推进器技术。AWJ-21TM 型喷水推进器是一种质量轻的紧凑型推进器,使舰艇能在浅水水域航行。AWJ-21TM 型喷水推进器集成了操舵和倒车系统,免除了舵、轴、螺旋桨轴架等设备和附体,从而提高了舰艇在低速航行时的机动性。与普通的喷水推进器不同,AWJ-21TM 可完全在水下作业,减少了噪声和水面尾迹,提高了舰艇的隐身性。

南非海军的 4 艘 3500t 级的 MEKO A-200 型隐身护卫舰的推进器采用 WARP 模式,即喷水推进和螺旋桨推进联合使用。巡航时采用两台 MTU16V1163TB93 柴油机,各自驱动左、右舷两个调距桨;也可用一台柴油机通过交叉连接齿轮箱驱动左、右舷两个螺旋桨。一台通用电气公司的 GE LM-2500 燃气轮机,位于船尾艏部,通过齿轮箱驱动一台瓦锡兰的 LJ210E 喷水推进器。

5.1.3.5 登陆舰艇

登陆舰在浅海航行和抢滩登陆时,吃水浅,容易产生浅水效应,使推力急剧降低,操纵不灵和产生尾吸。既不利于登滩和退滩,也容易使暴露在船体外的螺旋桨损坏。采用喷水推进后浅水效应的影响大大减小,系泊拖力大,推进和操纵性得到很大改善。

5.1.3.6 两栖车辆

现代登陆作战要求登陆部队能够快速、机动、突然地在敌海岸防御薄弱的地段登陆。如果登陆部队下舰点离岸过近或由舰到岸的航速过慢,都会使运输舰和登陆部队过早地暴露在敌火力威胁下而遭受重创。为了满足登陆作战的新需求,各类设计先进、高速的两栖作战车辆相继应运而生。这类两栖车辆的推进系统往往采用了喷水推进。采用喷水推进,推进器安装在车体内,不容易损伤,且轴流式推进泵结构紧凑,可采用比螺旋桨更小的直径来吸收更多的功率,使车辆达到高航速的要求,因此受到水陆坦克等两栖装甲车辆设计师的青睐。

美国海军陆战队的 AAV 两栖攻击车 (Advanced Amphibious Assault Vehicle),该车装有两台喷水推进器,最大可提供 10kN 以上的推力,可实现向左、向右和向后定位,用喷射流偏转装置可实现车辆在水上的转向和倒车,具有良好的机动性。它的设计航速为 20~25 节,是目前世界上现役两栖装甲车辆的数倍。除了美国之外,中国、韩国等多个国家业已拥有或正在开发多种型号的喷水推进两栖攻击

车辆。

5.2 泵喷推进

喷泵 (pumpjet) 是一种较为特殊的船舶推进器。在机械结构上泵喷有两类, 一类是带有喷口的一种减缩型导管螺旋桨, 因其复杂且技术先进, 这种泵喷多用于少数核潜艇或常规潜艇; 另一类是带有喷口的离心泵喷水推进, 这种泵喷用于辅助船舶的主推进或辅助推进。

5.2.1 导管型泵喷

这种泵喷在外形上像个导管螺旋桨, 但与普通导管桨有本质的差别。导管型泵喷的桨叶面积大且桨叶数目一般多于 7。该导管是一个渐扩型流道 (见图 5.5-25), 其内水流是减速的。根据伯努力方程, 流场的静压头提高, 这有助于推迟空化的产生。在桨叶的前面或后面有若干导叶, 其数量一般少于桨叶数, 其作用是整流, 使流场均匀, 削弱旋转尾流 (伴流) 以降低噪声或回收能量以提高推进效率。泵喷的多桨叶数和大盘面比可大大降低螺旋桨负载, 避免叶梢旋涡诱发噪声。导管本身能起到噪声传播途径 (方向) 上的部分屏障作用。由于这些原因, 使得导管型泵喷辐射噪声大大降低, 它很适用于潜艇和鱼雷。

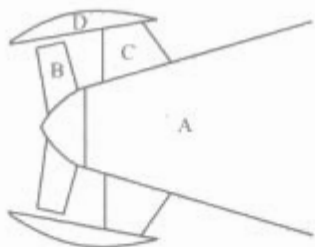


图 5.5-25 潜艇的泵喷 (导管桨型) 内部结构

A—艇体; B—叶轮即桨叶; C—导叶; D—导管

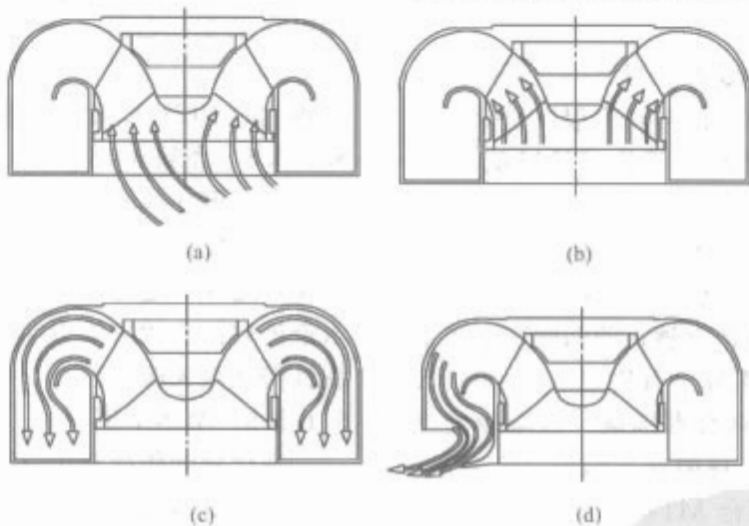


图 5.5-26 离心型泵喷工作原理

(a) 船底吸水; (b) 动能转换;
(c) 出口喷嘴; (d) 产生推力

国外使用导管型泵喷, 大多为核潜艇, 如美国的海狼级核潜艇、弗吉尼亚级攻击性核潜艇、英国机敏级攻击性核潜艇、先锋级弹道导弹型核潜艇、俄罗斯特拉法尔加级核潜艇、法国凯旋级弹道导弹核潜艇。俄罗斯基洛级 B-871 是世界上唯一的使用泵喷技术的常规潜艇。另外, 美国的 MK-48、MK-50 鱼雷、北约的 MU90 先进轻型鱼雷也都采用了泵喷技术。

5.2.2 离心型泵喷

这种泵喷实际上是按离心泵原理工作, 本应归属于喷水推进器 (waterjet) 一类, 但设计和生产厂家将其命名为 pumpjet。离心型泵喷的叶轮将船舶底部的水通过栅格 (见图 5.5-26) 吸入并对其做功, 水进入泵壳后通过出口喷嘴喷出。这种喷水推进器结构较为紧凑, 水的进、出口都安装在船底, 使其非常适用于平底船或吃水浅的船舶。由于喷口方向可以在 360° 范围内改变, 该种推进器为船舶提供了优良的操纵性。

离心型泵喷推进器的工作原理见图 5.5-26。叶轮通过进水流道从船底吸水 [见图 5.5-26 (a)]。为了防止水中异物进入, 进水口设有栅格。叶轮对水做功, 增能后的水流进入扩压器 (扩散管), 动能转换成压能 [见图 5.5-26 (b)]。水在扩压器 (扩散管) 的流动过程中能量变换过程一直进行着。水流聚于压力外壳内后从出口喷嘴以 15° 角度喷出 [见图 5.5-26 (c)], 其反作用力即为推力 [见图 5.5-26 (d)]。由于出口喷嘴方向可以 360° 转动, 这样推力方向可在这些角度内变化。

离心型泵喷推进器在国外军船和民船以及主推进和辅助推进都有使用, 但辅助船的辅助推进使用为多。单个离心型泵喷的最大功率现有产品为 3500kW , 泵转速 1000r/min , 但现已装船使用的为 2200kW , 泵转速 980r/min 。

第6章 船舶电力推进的监测与控制

1 船舶电力推进监控概述

1.1 船舶电力推进监测与控制技术现状

电力推进监测与控制系统主要涉及电力推进系统、执行机构系统、传感器系统和控制计算机系统。设计与制造的任务则是按工程标准规范,将这些子系统进行有目的的整合,完成满足要求的监测与控制功能。

控制计算机系统由硬件/软件平台组成,至少有一个含有CPU和I/O的控制器或处理器,装有基础软件和应用软件,有一个或几个操作台的机柜。机柜有一系列接口,作为传感器输入、每个控制器I/O单元和网络转接。控制计算机系统执行所有依照电力推进监控原则设计,进行监测和指令设备所需的计算,以实现一整套有计划目的或具备系统特征动作的功能。其他的功能涉及相关的安全性、系统完整性、正确的故障保护和操作,针对系统故障和有限的适应外部环境的安全策略(如主动重构)。

一个船舶电力推进监控系统自然要与电力系统、配电系统、开关设备和与电力变换器一体化的推进电动机、后传动设备,以及它们工作的物理过程相关联。通过不同的传感器测量和/或执行机构完成一系列操作。因此,电力推进监控系统的设计实现,可以从下面一些子系统着手整合:

(1) 监控系统——将事先设计好的一系列传感器以操作员站集成。操作员站在船上不同位置会有不同称呼,但一般装备有用于监视(开环控制)各设备基本物理状态和工作过程的各种指示器和警报器。

(2) 指令系统——按要求设计好的执行机构,用于接受来自操作员站的指令,并按预定逻辑,操纵指定设备(开环控制)。

(3) 反馈控制系统——通过计算机的算法设计,将监控系统和指令系统进行组合而成。用于依照某一控制目标,完成特定设备特定状态的自主控制。

从本质上说,现在的船舶电力推进监控系统都是“量身定做”结构。

通常的推进控制器会设有下列接口:辅推/主推系统,发电及配电系统和/或功率管理系统,有遥控手柄的桥楼控制系统,自动航行系统及动力定位系统等。电力推进控制的一个基本功能是:正常情况时,将转速、转矩和动态性能置于预定的限额范围之内,然后将转速维持在给定的参考值。电力推进操作是可能会引起全船停电事故的主要原因,为规避这种失控性故障,可以考虑将电力推进设备和其他动力机械中可用的执行机构耦合入电力系统的功率/能量管理系统(PMS/EMS),使各种动力机械具备诸如自动起/停的功能;在必要时,可将推进或其他负载减额,甚至于为卸掉那些非关键性负载提供操作条件。利用对推进电动机转矩或功率的恰当控制,可以有效地克服对电网扰动和性能参数的冲击以保持电力系统的稳定条件。

1.2 船舶电力推进监测与控制技术发展影响

(1) 计算技术。可将现代船舶电力推进监测与控制系统

看成一个计算机监控系统(computer supervisory control system)。当中,各计算机要分工协调完成输入处理、巡回检测、信息加工、分析决策以及输出控制调节等一系列功能。软件的作用越来越重要,在全船综合自动化系统的区域级优化层面,甚至于有“软件就是一切”的说法。

(2) 系统的开发与集成。基于模型的系统设计方法采用一种称为“V”模式的系统开发流程。它包括需求定义、系统级规范说明书、子系统设计、子系统实现、子系统整合与试验、系统级集成与试验、全综合与试验。在一个新建项目中它是联系技术条件,软件和硬件设计、开发和集成及所有阶段的试验工作过程的纽带。像ALSTOM、ABB等公司,早已将此模式规范为船舶自动化和轮机控制系统的标准设计方法。

这种方法的关键在于模型。要求从模型得出的结果具有预测性,则模型应与工程中实际目标系统存在足够的恒等关系。而直接决定这种恒等关系的要素是系统复杂性。困难在于复杂系统显现出下面两方面属性:一是系统的特性不同于部件特性的简单总和;二是不允许人们用各个部件行为的知识,去预测整个系统行为。但在船舶电力推进系统控制问题上,系统的复杂性是不可避免的。这样监控系统设计工程师必需要在置信度与模型简化之间,成功地进行折衷。

例如:

船舶电力系统采用50Hz频率供电,带50Hz频率负载时,在平衡状态下,这个系统是稳定的,也可以预测。多台发电机并联运行或电力推进不可避免采用变频负载,都会使这个脆弱的船舶电力系统变得不稳定和不可预测,其他状态可能就跟着会出现。况且无论是发电、配电或电力推进,总免不了要由人操作,可以用简化方法处理复杂系统。一般的简化途径有物理隔离且创建受控并可预测的系统状态或添加上智能化设备支撑。但这些做法,全都需要付出增加细节、尺寸、质量和费用的代价而使得工艺变复杂,应用范围减少。另一方面,面对不断要求提高计算能力、使用新的建模方法和仿真工具,又都会不可避免地要求允许增加许多设计细节。

(3) 半实物仿真试验。半实物仿真(Hardware-In-Loop Simulation, HILS),一般是指将实物(如控制器)与对象的仿真模型(数学)连接在一起进行实验的技术。因为试验中,实物与仿真模型间的比例,可以根据不同目的和需要而改变;再因为可以将电气、机械、水动力、环境(热、海况、冲击)等集成在一个仿真试验环境中,并反复执行仿真试验。这样,可使潜在的设计失误发生之前将它们识别出来,以达到风险最小化的目的。所以,人们已将此技术成功地用于许多工程活动的不同阶段。如舰船新装备的系统概念研究、可行性分析与设计,系统开发的测试与评估、集成验证,装备出厂鉴定试验、系泊试验和海试,还可包括人员培训、使用与维护及现代化改造等。无疑,这是加快研制进度、节约开支、有效降低项目技术风险行之有效方法。今天,国外大多数行业承包商都有一个或多个半实物仿真实验室。国内许多民用行业(如汽车、航空、电力)的重要项目半实物仿真试验也达到了较高水平。

为一个特定控制系统配置，由硬件和软件组成的半实物仿真器，应是深思熟虑的结果。半实物仿真实验基本特征体现在两个方面：半实物仿真器中软件与硬件的比例和建模处理的水平。因此，要求实际中半实物仿真试验设计者对其可获得的配置数据和实践知识进行恰当综合，以实现各种不同的装置。

半实物仿真实验是一个应用于基于模型设计贯穿产品全寿命周期的方法。但对一艘新建船舶，主要试验活动通常被划分为卖方工厂试验，买方码头系泊试验和海试。而对一艘已投入营运的船舶，试验活动则可分为系泊试验、海试和航行试验。新建系统，最大的试验范围一般会在工厂接收试验和系泊试验阶段进行。监控系统设备装置在工厂进行接收试验的目的，是检验控制系统与其功能要求的一致性。要求仿真器中大部分的设备（传感器、执行机构和机械设备、船舶动态等）用半实物仿真软件建模。这样可以便利地开展更为广泛的试验。上述试验将构成海试的基础。海试和船东接收试验的目的是检验全部装船的控制系统的与其功能要求的一致性，验证其是否满足预期使用和管理要求。各阶段半实物仿真硬、软件的比例各不相同。

成功的验证结果应记入验收证书中，作为全船分级的一部分。现在，半实物仿真试验已经被提议作为船舶控制系统验证和人级认证的一种新方法。

(4) 基于网络的控制。控制的发展下一步将更多地涉及到因特网与实际环境的交互。会有越来越多的控制系统将基于网络运行。可以预见，传感器、执行机构、诊断、指令和协调信号都将经数据网传输。计算与控制功能由分布在多个与数据网连接的处理器上（如智能传感器可在传送重要信息之前完成大量的局部信号处理）执行。

设想发生下面一系列情况：传感器异步地将信息包传输到网上；控制器进行数据处理，然后将结果发送到执行机构。数据包的传输可能有时变延迟，甚至会丢失；通信连接也可能被断掉或受阻塞；传感器和执行机构本身可能变得可用或不可用；随时可能有新的传感器、执行机构和处理器被加入到系统中，并自动地进行重新配置以使用新的资源。但，只要有足够的可用传感器与执行机构，能保证允许足够的包通过，整个系统就能工作（或许一切还不如现今固定的、同步控制系统那样好）。显然，这种系统与目前的高性能控制系统完全不同。有理由期望将当前的控制系统与网络结合起来，建立基于包的网上的分布式控制系统的结构、设计和分析方法。如果做得好，或许还能将鲁棒控制系统的一些好的特性（如对参数变化与模型失配的鲁棒性）与网络结构的良好特性（如自构造、对总体拓扑变化与节点失效的鲁棒性、超越元件的可靠性等）结合起来。

大多数情况下，今天的电力推进控制工程师必需要同时解决好两种极端情况：完全同步的实时系统和完全异步的基于包传输的系统。

2 船舶电力推进监测与控制系统设计要求

2.1 环境要求

在舱室内应能在 0~+45℃ 温度范围内正常工作，在机舱内温度下限允许为 +5℃。

如有发热器件且无空调的封闭处所，还应能在 +70℃ 温度时不失效；安装在温度可能超出上述范围的部位，如在发动机、锅炉上或近旁等，则应特别考虑；安装在可能出现低温的处所，如敞开甲板，无保温措施的甲板室等，还应能在

-25℃ 温度时正常工作。

95%±3% 温度小于 +40℃ 时。

70%±3% 温度高于 +40℃ 时。

船舶电力推进监测与控制系统应能在各方向倾斜及摇摆 22.5℃，周期为 10s，以及垂直方向线性加速度为 ±9.8 m/s² 时正常工作。

船舶电力推进监测与控制系统应能适应船上盐雾、油雾、霉菌及灰尘等环境。

2.2 安装要求

船舶电力推进监测与控制系统应能在表 5.6-1 所述的振动条件下正常工作。

表 5.6-1 振 动 条 件		
安 装 位 置	振 动	参 数
一般处所	2.0~13.2Hz 振幅：±1mm	13.2~100Hz 加速度：±0.7g
往复机上如柴油机、空压机上及其他类似处所	2.0~25Hz 振幅：±1.6mm	25~100Hz 加速度：±4.0g
其他特殊部位，如柴油机（特别是中、高柴油机）的排气管上	25~200Hz 加速度：±5.0g	

如在上述频率范围内发生共振，使振动超过上述规定值，则应采取适当措施予以抑制。

2.3 绝缘耐压要求

船舶电力推进监测与控制系统应满足表 5.6-2 所要求的绝缘电阻。

表 5.6-2 绝 缘 电 阻		
额定电压 (V)	试验电压 (DC)	要求值
≤65	2×输出电压	1MΩ
>65	500V	10MΩ

船舶电力推进监测与控制系统应能承受试验电压为 (2×额定电压+1000)V，频率为 45~62Hz 耐时 1min，无击穿和闪络。

2.4 工作电源要求

船舶电力推进监测与控制系统应能在表 5.6-3 所述的电压、频率条件下正常工作。

由蓄电池供电时，电压变化 -25%~+30%；如充电时，设备不接到充电的蓄电池上，则电压变化为 ±20%。

当电源的谐波成分不大于 5% 时，船舶电力推进监测与控制系统应能正常工作。

船舶电力推进监测与控制系统应具有必要的电磁兼容性。

表 5.6-3 电压和频率波动			
项 目	变化范围		
	稳态	瞬态	
	%	%	恢复时间 (s)
电压	±10	±20	1.5
频率	±5	±10	5

船舶电力推进监测与控制系统的电源应馈自主配电板或应急配电板(若设有时)并应设有备用电源。主电源失电时仍有必要供电的自动控制系统,应自动转接到备用蓄电池组并发出报警和予以指示,且备用蓄电池组的容量至少能维持30min供电需要。

2.5 主要功能性能要求

船舶电力推进监测与控制系统应能满意地实现预定的自动化监控功能。

船舶电力推进监测与控制系统应具有自检功能。查出故障后,应以适当的方式指示出故障的位置,并发出报警。硬件的设计应尽可能模块化,以便检测和更换。更换模块或部件时,应有措施防止被控机电设备处于不安全状态。

人机对话应尽可能简单,至少应设一专用键或采用其他等效方法能随时中断计算机运行,以便在必要时,将机电设备的控制转为就地人工控制。

控制重要机电设备的计算机或其主功能模块出现故障时,如既不能及时转换至机电设备的人工控制,又不能使机电设备处于预定安全状态,则应设有自动切换的备用计算机或功能模块。

显示器可作为报警显示用,但它应满足:应能清楚地显示出所有同时出现的报警;应以适当方式显示出故障报警在应答前后的区别,但不允许仅用不同颜色显示这种区别;应配有打印机记录故障的内容;至少有一台备用的显示器;主电源失电时,显示器仍能正常工作;如参数显示与报警合用一个显示器时,不应妨碍报警信号的显示。

船上的控制站(室)可有机舱集控室、驾驶室控制站、就地控制站、桥翼控制站等。

各控制站(室)之间对可以共同控制的机电设备在正常运行或发生故障时,应能实施转换。转换时,不允许引起设备运行状态的严重变化。

机舱集控室与驾驶室之间的转换,只允许在机舱集控室进行;就地控制站与机舱集控室或驾驶室控制站之间的转换,只允许在就地控制站进行。

转换应得到接收控制的站(室)的应答后才完成。

在所有的控制站(室)均应指示哪个控制站(室)正在进行控制。

在同一时刻,只能有一个控制站执行控制。

2.6 监控系统网络的要求

冗余的LAN当为连续可用性、高可用性的功能服务时,网络之间的转换应是自动的,其他的转换可以是手动的,只要这种转换是简单而又无歧义的。

对于网络间的连接,互连的网络要能互相独立,互连的设施可以是路由(router)、网桥(bridge)或网关(gateway)。

网络的拓扑结构应做到,当节点间发生故障时,网络上各系统要继续工作,数据传输要保持。

通信协议要确保网上数据流的完整,此外分享网络的计算机软件设计要进行数据值极限的校核。

网络要能传递最大可能的数据速率,而不致引起不能接受的数据等待或数据碰撞。在安全和报警显示方面的数据等待极限时间在2s以内。

网络的安装要足以防止机械损伤和电磁干扰。

2.7 监控系统用传感器的要求

传感器应能长期稳定地正常工作,其量程和频率特性应与被测参数预计的最大变化范围及变化速率相适应,并应有适当的精度和灵敏度。

传感器应在其安装位置对环境条件有良好的适应性。传感器应牢固耐用,具有良好的机械保护,可靠的电气连接和良好的绝缘性能。

传感器的安装位置应能正确反映被测参数,并易于接近、测试。在难于接近和拆装的位置,还应加装一个备用传感器。

如相互独立的监控系统测量同一参数的传感器及其信号电缆的故障能得到有效的检测,则允许合用一个传感器。但对规定要求设置2只传感器者除外。

2.8 控制软件基本要求

控制软件按功能分解成模块,这些模块既有一定的独立性,同时又有一定联系。每一模块的编制要求相对独立,以便对各模块进行检验、修改、说明和维护。

系统的控制软件要具有较高的可靠性和抗干扰能力,而且还要具有良好的开放性,便于软件升级和功能扩展。

用于自动化监控的程序和数据应存放在永久存储器中。如程序和数据的一部分存放在非永久性存储器中,则船上应配有该程序和数据的数据的复制件及重新输入该程序和数据的数据的设备,并应有措施检查程序和数据的数据的正确输入。

3 船舶电力推进监测与控制系统设计

设计船舶电力推进监测与控制系统必须按用户所提出的要求,主要是依据被监控对象的特点,明确对电力推进监测与控制系统的基本性能要求。同时要充分了解市场上相关设备、器件的性能、质量、价格和服务等,在此基础上开展设计。

船舶电力推进监测与控制系统设计主要内容和步骤可分以下几点。

3.1 方案的初步制订

首先根据电力推进系统的需要,对电力推进监测与控制系统有一个初步设想,确定电力推进监测与控制系统的基本架构。是采用集中式监测与控制,还是选用分布式监测与控制;是采用模拟式还是全数字式;系统是否采用网络技术,选用几级网络;整个系统由哪些主要部分或设备组成。当然事先可以制订多个总体方案,以便进一步分析比较。

3.2 监测与控制网络设计

随着计算机技术、通信和网络技术的迅速发展,以及船舶推进系统自动化、信息化的要求,船舶电力推进监测与控制系统越来越多地采用网络技术。

在总体方案提出的网络结构仅仅是一个粗略的轮廓,必须根据电力推进监测与控制系统具体性能要求和技术指标,譬如在网络上交换的信息量、实时性、误码率、通信可靠性等,以及监测与控制系统所监控的对象特点,选择具体的网络组件。包括网络的拓扑结构(是总线网、星型网,还是环形网、协议;是走令牌,还是主从)、网络介质、交换机、中继器、网关等。

舰船电力推进系统典型监测与控制网络单线图如图5.6-1所示。

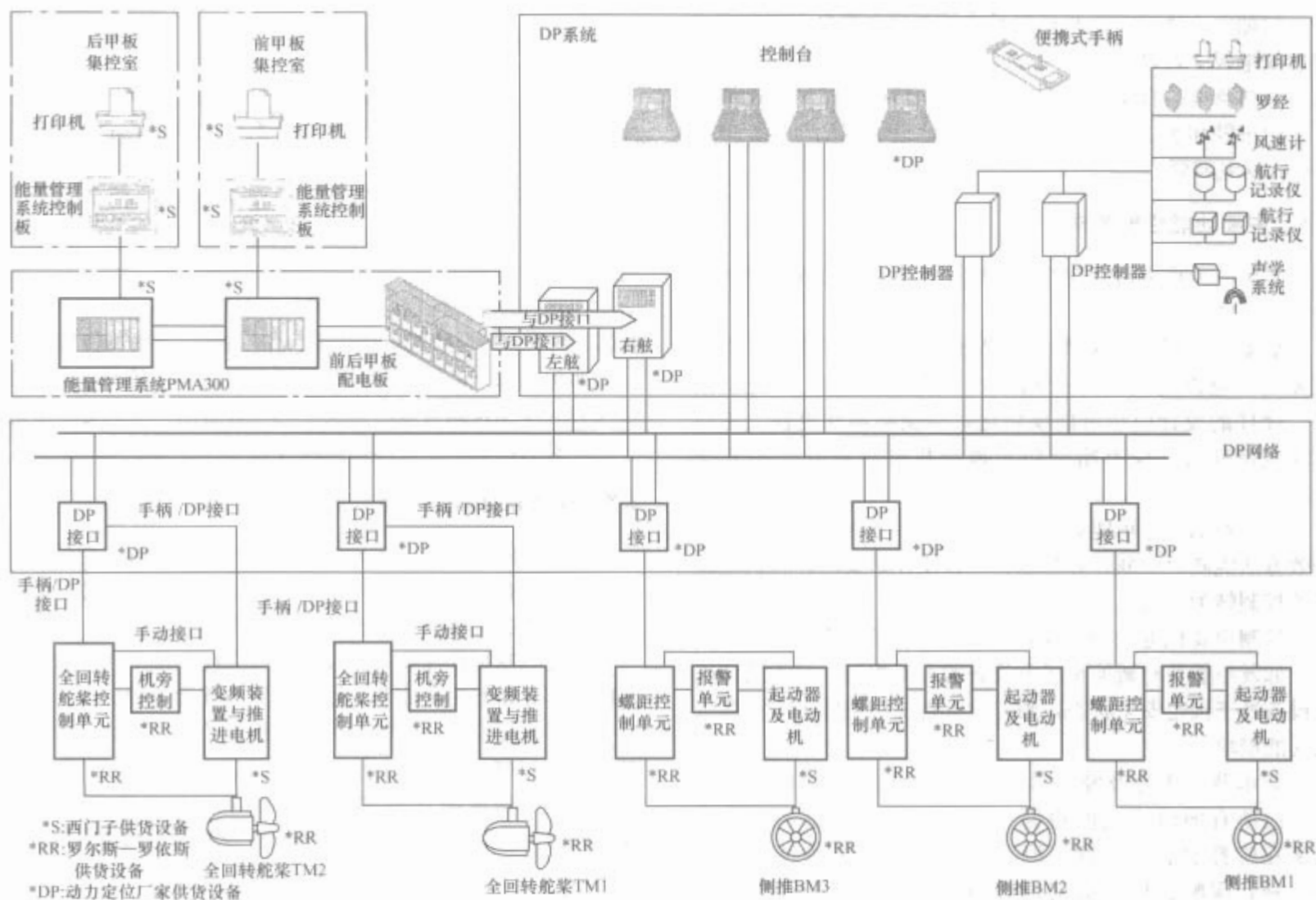


图 5.6-1 某船电力推进系统典型监测与控制网络单线图

3.3 监测与控制系统设计

船舶电力推进监测与控制系统是船舶电力推进系统的重要组成部分，主要完成电力推进系统各组成设备主要运行技术参数、工作状态的监测和电力推进系统的操作控制以及故障监测、报警、保护等功能，并通过便捷、友好的人机界面进行显示、报警等。

3.3.1 信号、电源、接地的抗干扰设计

3.3.1.1 信号系统的抗干扰措施

信号的抗干扰重要措施之一是采用信号隔离，信号隔离可以采用隔离放大器，也可以采用光电隔离器件，是监控计算机与测量、控制现场没有直接的电的联系。对于空间干扰，信号通常用屏蔽的双绞线转送，当传送距离较远时，应加金属管屏蔽；对于串模干扰，除了信号屏蔽外，还采用RC滤波和数字滤波；对于共模干扰，可以采用信号放大器浮空加屏蔽及信号隔离等措施。

3.3.1.2 电源系统的抗干扰措施

对于交流电源一般采用变压器隔离、LC滤波、交流稳压和不间断电源。

对于直流电源加稳压、RC滤波；对于印刷电路板及IC芯片电源加置RC滤波。

对于电源系统中的电源变压器一律加电磁屏蔽，最大限度地减少电源系统被干扰地可能。

3.3.1.3 接地系统的抗干扰措施

接地的正确性和良好性，直接关系到系统的抗干扰能力和工作的稳定性和可靠性。

(1) 印制电路板的地线。在电路板设计中尽量采用多层板，其中几层作整体地线；在电路板上采用环抱网状接地，即将电路板的空位和边缘留作地线，边延地线作为主干线，

而且要尽量宽；平行信号线间，尽量添加地线。

(2) 输入、输出系统的地线。在输入、输出接口中，各种开关、按钮容易产生抖动脉冲干扰，接口电路中存在各种感性负载，还存在瞬态冲击电流很大的阻性负载。另外，各种引线敷设很长，这些都是产生和引入干扰的因素，针对以上情况，可采取以下措施：

接口地线在敷设过程中应连接可靠，绝缘良好；不同等级的电压、电流线和容易引进干扰的信号线，应分别设置地线；在信号电缆束中，合理设置地线，对信号线起到屏蔽和隔离作用；输入、输出信号的地线在可能的情况下要分别设置，而且要尽量粗。

3.3.2 电力推进监测与控制面板设计

舰船电力推进控制系统的操作控制一般分为驾驶室（含两翼）、机舱集控室和机旁三个操作，在系统运行过程中可以相互转换，而且有操作优先级，任何时刻只允许一个操作位置有效。

(1) 控制转换到较高优先权的控制地点。在带有较高优先权的控制地点上，操作员可以直接接管控制权。转换过程是：

- 1) 控制首先是在带有较低优先权的控制系统上。
- 2) 操作员将控制转换到带有较高优先权的控制系统上。
- 3) 在较低优先权的控制系统上声光指示，表示控制已失去。
- 4) 推进控制将开始跟随新的参考值。

(2) 控制转换到较低优先权的控制地点。在较高优先权控制地点，操作员将控制权移交给较低优先权控制地点。接收的控制地点应确认收到控制权，并得到获得控制权的指示。只要没有经过确认，控制权利仍会处在较高优先权控制地点。通过预设接收控制地点，可以实现提前确认。

3.3.2.1 驾驶室操纵面板

(1) 组合式速度操纵装置。用于设定螺旋桨的速度给定。

(2) 指示仪表。螺旋桨转速指示。

(3) 驾驶室与集控室控制地转换控制组合。

1) 转换按钮(带灯光照明)。

2) 蜂鸣器。

3) 当前控制部位指示灯。

(4) 主控台与桥翼控制站选择及指示组合。

1) 本站获取控制权按钮。

2) 控制权在右桥翼指示灯。

3) 控制权在左桥翼指示灯。

(5) 转速机旁控制信号灯。当在推进机舱选择转速机旁控制时,转速控制系统进入机旁就地控制模式,该信号灯将会点亮。

(6) 紧急停车按钮(硬连线到电机起动装置)。紧急停车用于立即断开电动机电源,正常的停车等到电动机转速降低到某一程度时才断开电动机电源。

(7) 驾驶室故障报警模板。

(8) 调光器及灯测试。

3.3.2.2 驾驶室桥翼操纵面板

(1) 组合式速度操纵装置。用于设定螺旋桨的速度给定。

(2) 指示仪表。螺旋桨转速指示。

(3) 主控台与桥翼控制站选择及指示组合。

1) 本站获取控制权按钮。

2) 控制权在驾驶室主控制台指示灯。

3) 如果是左桥翼面板,则是控制权在右桥翼指示灯(如果是右桥翼面板,则是控制权在左桥翼指示灯)。

(4) 紧急停车按钮,硬连线到电机起动装置。

(5) 调光器及灯测试。

3.3.2.3 机舱集控室操纵面板

(1) 指示仪表。

(2) 螺旋桨转速指示。

(3) 速度控制手柄。

(4) 集控室与驾驶室控制地转换控制组合。

1) 转换按钮(带灯光照明)。

2) 蜂鸣器。

3) 当前控制部位指示灯。

(5) 转速机旁控制信号灯。

(6) 机舱集控室故障报警模板。

(7) 灯测试按钮。

3.3.2.4 推进机舱操纵面板

该面板安装在一个控制柜上,控制柜安放在推进器舱。控制面板包括:

(1) 螺旋桨转速指示。

(2) 应急车钟。

(3) 本地操舵/遥控操舵选择开关。用于选择机旁或者集控室与驾驶室遥控方式。

(4) 微型终端面板。微型终端面板包括一个数字显示器及一个功能键盘,用于调节、维护和故障排除。

3.4 监测与控制系统软件设计

随着计算机、通信、软件技术的不断发展,监测与控制系统软件设计也发生了根本变化。组态软件已逐步成为监测与控制系统软件设计的主流设计方法。

监控组态软件是面向监控与数据采集的软件平台工具,具有丰富的设置项目,使用方式灵活、功能强大。早期监控组态软件主要解决人机图形界面问题。随着监控组态软件的快速发展,实时数据库、实时控制、通信及网络、开放数据接口和对 I/O 设备的广泛支持也成为其主要内涵。

表 5.6-4 国际上比较知名的几种监控组态软件

序号	公司名称	产品名称	国别
1	Wonderware	Intouch	美国
2	Intellution	iFIX	美国
3	西门子	WINCC	德国
4	国家仪器仪表	LabView	美国
5	罗克维尔	RSView	美国

现场总线是一种特殊的网络技术,其核心内容一是工业应用,二是完成从模拟方式到数字方式的转换,使信息在一根双绞电缆上传输。同其他网络一样,现场总线的网络结构也具备 OSI 的若干层协议。现场总线技术的成熟发展更加促进了组态软件的应用。

组态软件一般由图形界面系统、实时数据库系统、第三方程序接口组件和控制功能组件等组成。组态软件最突出的特点是实时多任务。如数据采集与输出、数据处理与算法实现、图形显示与人机对话、实时数据的存储、检索管理、实时通信等多任务同时运行。

工程设计技术人员在组态软件中填写事先设计的表格,再利用图形功能把被控对象形象地画出来,通过内部数据连接把被控对象的属性与 I/O 设备的实时数据进行逻辑连接。当由组态软件生成的应用系统投入运行时,与被控对象相连的 I/O 设备数据发生变化会直接带动被控对象的属性变化。

组态软件设计的一般步骤:

(1) 收集具体工程应用对象的所有 I/O 点,并填写 I/O 参数表。

(2) 明确所使用的 I/O 设备的特征,使用的通信接口、采用的通信协议,以便在组态时准确定义 I/O 设备。

(3) 标识 I/O 点。每个 I/O 标识是唯一的,组态软件通过向 I/O 设备发出 I/O 标识请求对应的数据。

(4) 根据工程的工艺过程设计画面结构和画面。

(5) 根据 I/O 参数表,建立实时数据库,组态各种变量参数。

(6) 在实时数据库中建立实时数据库变量与 I/O 点的一一对应关系,即定义数据连接。

(7) 组态静态的操作画面。

(8) 将操作画面中的图形对象与实时数据库变量建立动画连接关系,同时规定动画属性和幅度。

(9) 对组态内容进行分段调试和总体调试。

3.5 人机界面设计

典型电力推进系统监测与控制界面如图 5.6-2 所示,其主要组成部分和功能如下:

(1) 登录界面:进行系统登录和用户管理。

(2) 主导航栏:切换查看舰船电力推进系统个监控子画面。

(3) 状态栏:显示当前系统运行状态、运行时间和指示所监控的子系统,同时包含若干监控系统的快捷按钮。

(4) 主监控界面:主监控画面主要显示当前所监控的子系统的具体情况,为监控界面的核心,主监控画面一般由分导航栏和监控画面两部分组成。

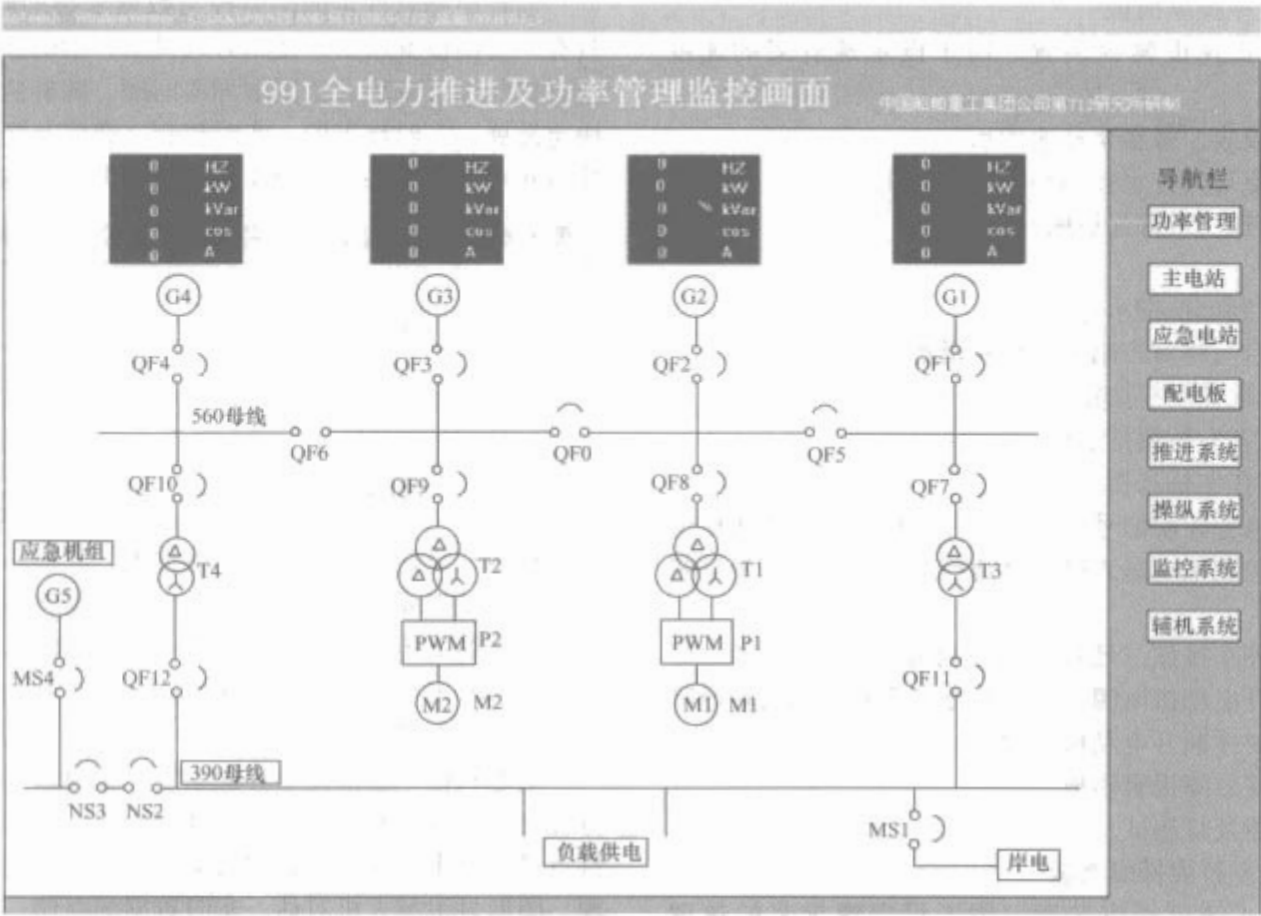


图 5.6-2 某船电力推进系统监测与控制界面

(5) 报警画面：主要分实时报警和历史报警，当某个系统发生故障报警时，监控界面自动切换到实时报警界面，状态栏的报警状态闪烁显示，同时发出报警声响，直到实时报警被确认为止。

(6) 趋势画面：分实时趋势和历史趋势，主要用于显示舰船电力推进的功率趋势、温度趋势等。

(7) 日志系统：记录不同用户对监控系统的登录、注销、对数据库的访问、修改等。

4 船舶电力推进监测与控制系统方案实例

4.1 某船电力推进监控系统设计

4.1.1 系统概述

某船综合全电力推进系统采用 4 台柴油发电机组并网发电组成船舶电网，为日用以及 2 套推进系统供电，每套推进系统包括一台推进变压器、一台变频器以及一台推进电机。每台电动机由独立的变频器供电，每台变频器通过推进变压器连接到船舶电网，如图 5.6-3 所示。

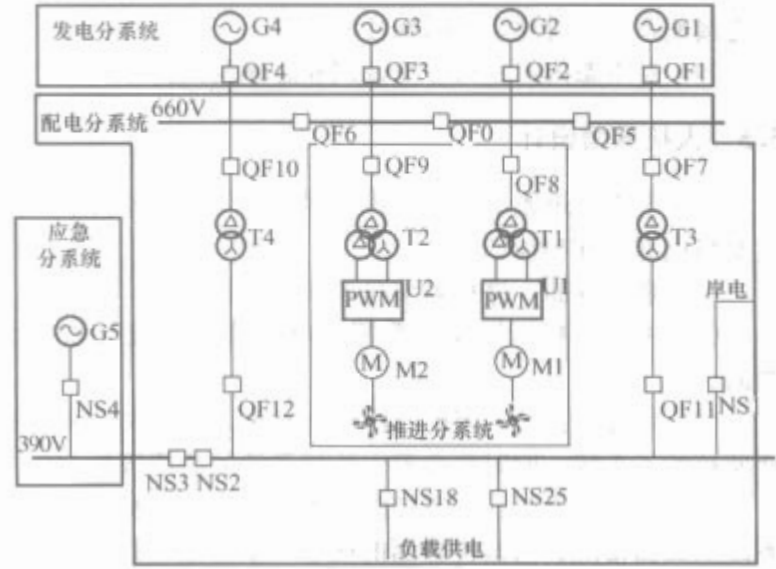


图 5.6-3 某船综合全电力推进系统

对于这样的综合全电力系统，监控系统作为综合全电力推进系统的控制中心，控制对象主要有柴油发电机组、发电配电屏、变流调速驱动推进装置（推进变压器、变频器、推进电动机）、配电变压器、中央控制台、驾驶室推进控制台、车钟系统以及一些辅机控制箱。根据功能划分，可将监控系统控制对象分为发电分系统、推进分系统、配电分系统、应急分系统四部分。

监控系统能对各组成设备实施实时控制、有效的故障诊断与保护，能自动协调柴油发电机组和电力推进功率，实时记录系统的事件信息及系统设备的运行参数和状态。功率管理和监控系统包括分布在整个电力推进系统内的传感器和执行机构。这些传感器和执行机构通过实时通信连接到中心处理器。功率管理和监控系统将实时监测电力推进系统各设备的运行状况，并利用对设备的在线检测，使操作人员全面掌握电力推进系统的运行状况，同时功率管理和监控系统利用检测的信息对电力推进系统进行评估、故障诊断和故障报警等，从而提高电力推进系统的可靠性和维修性。

4.1.2 系统设计

船舶监控系统的控制对象分布于不同的舱室，舱室之间布线不便，通常采用分布式网络控制系统，而对于分布式控制系统，控制系统的稳定性、可操作性很大程度上取决于控制网络设计。包括控制网络现场总线的选择、网络传输介质的选择、控制网络拓扑结构的设计。

(1) 现场总线选择。在过去的十多年里，随着生产车间自动化和过程自动化中分散化结构的迅速增长，现场总线系统的应用日益普遍。现场总线系统实现了数字和模拟输入/输出模块、智能信号装置和过程调节装置与可编程逻辑控制器（PLC）和 PC 之间的数据传输，把 I/O 通道分散到实际需要的现场设备附近，使安装和布线的费用开销减少到最小，从而使成本费用大大地节省。另外，标准化的现场总线具有“开放”的通信接口，允许用户选用不同制造商生产的分散 I/O 装置和现场设备。

在选用现场总线时,我们对多种现场总线进行比较,特别是对较具竞争力的几种总线,如 PROFIBUS、FF 总线、CAN、Lonworks 等。只有通过深入比较,才可能从市场上大量可供应的现场设备和部件中选择最佳的产品组成所需要的系统。根据数据传输容量的不同,可分为数据流总线(如 FF 等)、字节总线(如 PROFIBUS、Device Net 等)和位总线(如 AS-I 等)。数据流总线适用于大型系统的信息传输与过程控制;字节总线有开关量和模拟量 I/O,适合于 PLC 和过程控制应用,数据量适中,实时性也可以得到保证;位总线传送二值信号,适用于简单开关量 I/O 等。显然,本系统实时性要求较高,数据量适中,应该选取字节总线。根据控制对象的情况可最终确定总线方案,本船的推进部分采用 SIEMENS 公司的 6SE71 系列变频器以及多种 SIEMENS 控制器,由于这些设备都集成了 PROFIBUS 总线接口,因此功率管理与监控选用 PROFIBUS 现场总线来构造控制系统网络,不仅降低改造成本,提高了系统的智能化和自动化程度,而且使整个系统的控制水平得到了很大的提高。

现场总线 PROFIBUS 满足了生产过程现场级数据可存取性的重要要求。一方面它覆盖了传感器/执行器领域的通信需求,另一方面又具有单元级领域的所有网络通信功能。特别在“分散 I/O”领域,由于有大量的、种类齐全的、可连接的现场设备可供选用,因此 PROFIBUS 已成为事实上的国际公认的标准(现场总线 PROFIBUS 是国际标准 IEC 61158 的组成部分 Type III)。

连接在 PROFIBUS 现场总线上的站点分为主站和从站,PROFIBUS 总线存取协议包括主站之间的令牌传递方式和主站与从站之间的主从方式。令牌传递方式确保得到令牌的主站可在一个事先规定的时间内得到总线控制权,令牌传递就是在总线上传递总线控制权,连接到 PROFIBUS 的主站按其总线地址的升序组成一个逻辑令牌环,令牌是按主站地址升序在令牌环中传递,为了使逻辑令牌环闭合,具有最高总线地址的主站总是把令牌环传递给具有最低总线地址的主站。主从方式允许得到令牌的主站可以与所属的从站进行通信,主站向从站发送数据或发出轮询,从站接收数据或者接收到轮询后进行应答。总线启动或初始化时,介质存取控制(MAC)通过辨认主站建立令牌环,并将这些主站的地址保存在主站列表(LAS)中,LAS 可以在运行期间自动更新,可以自动剔除有故障的主站节点,也可以添加新的主站节点到令牌环中。

(2) 网络介质选择及拓扑结构设计。用玻璃或塑料纤维制成的光纤电缆可用作 PROFIBUS 传输介质,目前光纤能处理的连接距离达到 15km。光纤通信作为第三代有线通信技术,具有大容量、速度快、线路损耗小、抗干扰等突出优点。光纤技术的成熟已经为新型的总线结构打下了坚实的基础,使用光纤技术,可以构建更加复杂的网络拓扑结构,如环形结构,此外还有线型、树型或星型结构,光纤链路模块(OLM)可以用来实现光纤环网。在光纤环网中,OLM 通过双工光缆相互连接,如果光纤发生断线或 OLM 故障,它们将作出反应并自动地切换总线系统成线性结构。一旦光纤导线中的故障排除后,总线系统即返回到正常的冗余环状态。因为每条光缆有发送光纤以及接收光纤组成,有些文献把这种称为冗余双环。

(3) 控制网络设计。现场总线控制系统结构按照职能分为三层:现场控制层、过程监控层和管理层。如图 5.6-4 所示。其中现场控制层主要包括现场控制器 PLC、变频器、远程 I/O 设备等。过程监控层主要包括操作面板、监控工作

站以及其他工作站,它是联系现场控制层和管理层的纽带,通过与子站进行通信获取现场设备运行信息,并传送给管理工作站或服务器。管理层包括管理工作站及其他服务器,如知识库服务器、运行数据库服务器等。



图 5.6-4 控制网络分层

功率管理和监控系统是由中央控制台、驾驶室推进控制台和发电配电板、机旁控制箱组成,通过 PROFIBUS 现场总线相连,通过 OLM 实现光纤环网连接,中央控制台 S7-400 作为主站的单主站 PROFIBUS 系统,同时通过以太网与上位机相连形成计算机监控系统。

功率管理和监控系统对主推进系统的控制设备实行实时监控,实现航行工况及航速的集中控制;对柴油发电机组控制设备实行实时监控并显示。对发电配电分系统,主要操作模式有中央控制台自动、半自动、板前半自动、板前手动以及机旁操作。对推进分系统,主要操作模式驾驶室操车、中央控制台操车、中央控制台后备操车以及变频器机旁操车。

4.1.3 软件设计

本监控系统采用 SIEMENS 公司的 S7 系列可编程序控制器(以下简称 PLC) S7-400 为主控制器,结合外围控制电路组成计算机控制系统来控制、管理本系统相关设备。驾驶室推进控制台推进子站、配电子站选择 S7-300 作为控制器,应急子站选择 S7-200 作为控制器,发电子站采用 S7-300 作为主控制器,通过 PROFIBUS 连接 4 台 ET200M。

软件能实时对各种故障信号进行检测及判断,并及时作出处理。PLC 上电后,能对设备进行初始化及工作后的实时诊断,并且软件加入冗余和容错技术,进一步提高了系统的可靠性,可靠地输出正常工作信号和故障报警和保护信号。

功率管理功能由中央控制台 S7-400 协同系统设备完成,功率管理是本系统功能的一个很重要的组成部分,是船舶电力系统的核心。它可以根据功率需求以及机组运行状态对全船供电进行管理监控。他实现以下主要功能:

- (1) 电站机组控制模式选择。
- (2) 机组起动、解列顺序。
- (3) 负载检测、合理分配。
- (4) 母线开关管理控制。
- (5) 发电机管理与保护。
- (6) 母线电压、频率检测与管理。
- (7) 功率管理报警与事件信息。

S7-300 及 S7-400 系列 PLC 程序使用 Step7 编程语言编制。Step 7 编程语言与 SIMATIC S7 系列可编程序控制器 PLC 一起使用,用以实现各种自动控制功能。STEP7 引用

了结构化程序设计思想,采用软件块来构造程序。软件块分组织块 OB、功能块 FB、功能 FC、数据块 DB。组织块 OB 是操作系统与用户的接口,用以管理用户程序,可用于循环、中断驱动或定时驱动。PLC 系统在运行时实际上是循环调用组织块 OB 的,这样用户就是从 OB1 开始自顶向下构造程序的。功能块 FB 是在逻辑操作块内的功能或功能组,在操作块内分配有存储器,并存储有变量,需要背景数据块。功能 FC 是类似于 FB 的逻辑操作块,但是不分配存储区,不需要背景数据块。有许多标准功能块 FB 和功能 FC 由 OEM 提供。数据块 DB 存储用户数据。软件块可用嵌套调用。PLC 程序通过 Step 7 软件包实现程序编制、调试等功能。

S7-200 系列 PLC 程序使用 STEP 7-Micro/WIN 编程语言编制。它基于标准 Windows 操作系统,可以进行符号编程,通过符号表来分配符号地址和绝对地址。对 TD200 文本显示面板、PID 控制器、用于 CPU 之间数据传输的通信功能、高速计数器等,STEP 7-Micro/WIN 具有非常适用的向导功能,帮助用户快速完成自动化任务。

4.1.4 人机界面设计

本系统在中央控制台设有工控机一台,通过工业以太网与 PLC 通信,采用的上位机监控软件 Wonderware® In-Touch® 8.0 是用于工业自动化、过程控制和管理监视的一个强大的图形人机界面(HMI)软件。它在 PC 基础上开发的操作员监控系统,用于可视化和控制工业生产过程。同时以 Wonderware 公司的 InSQL Server8.0 提供工业实时数据库支持智能化和信息化,不仅提供更友好的人机界面,使信息更加详细,并可以向上提供标准数据接口,使监控系统与管理系统的沟通。这样,综合全电力控制系统将不再是信息孤岛,而成为全船信息系统的一部分。

991 电力推进监控系统,它可以对全船的各种设备的重要变量进行实时监控,主界面如图 5.6-5 所示,它主要组成和功能如下:

(1) 登陆界面:可进行监控系统登陆,由操作人员输入正确的密码方可进入系统操作。

(2) 导航栏:切换查看监控系统的各监控画面,主导航栏包括 8 个监控画面菜单:功率管理系统主电站系统、应急

电站系统、配电系统、推进系统、操纵系统、监控系统、辅机系统。

(3) 状态显示:指示当前所显示的监控画面,具体表现为当显示某监控画面时,背景画面上的绿线指示到主导航栏相应的菜单。例如:若当前显示推进系统监控画面则绿线指示导航栏中推进系统菜单。

(4) 主监控界面:主监控画面主要显示当前所监控的子系统的具体情况,为监控界面的核心部分。主监控画面由两部分组成:导航栏和监控画面。本监控系统的主监控画面是功率管理系统监控画面,它能实时监测各发电机的输出有功功率、无功功率、功率因数、频率、电流等变量,以及监测各开关和变压器、逆变器的工作情况。

(5) 报警查询系统:主要是向用户提供历史报警记录,当某个系统所监控的变量发生报警时,该变量名后的状态框会变成红色,音响发出报警声,直到报警被确认为止,报警查询系统则记录了该次报警,以便用户查询。

在推进控制台设有 OP 操作面板一个,通过现场总线 PROFIBUS-DP 连接到 PLC,OP 通过总线报文获取现场运行数据,以图形化方式显示系统运行状态,用户也可以通过它给出推进控制指令。OP 面板通过 COROS ProTool 软件包来设计画面。ProTool 是一个 Windows 支持软件包。利用它设计好画面后,通过编程器传送给 OP 面板,自动实现了 OP 面板与 PLC 的连接,实现了对系统的状态监控和其他功能。

4.2 采用 CAN 总线的多相推进电机控制系统

图 5.6-6 是某多相推进电机控制系统原理框图。推进电机是十二相电机,每三相为一个通道,共四个通道。控制系统各单元之间采用 CAN 总线通信。该总线将监控与实时控制连接为一体。

CAN 总线通信距离越远,波特率也越低,其关系见表 5.6-5。由于实时控制要求通信速率高,而且相互之间距离近,故 CAN-1 和 CAN-2 选择最高波特率 1Mbit/s。但遥控装置位于其他舱,与系统其他单元之间的距离远,仅传输操作命令和用于显示的信息,要求通信速率不是很高,因此遥

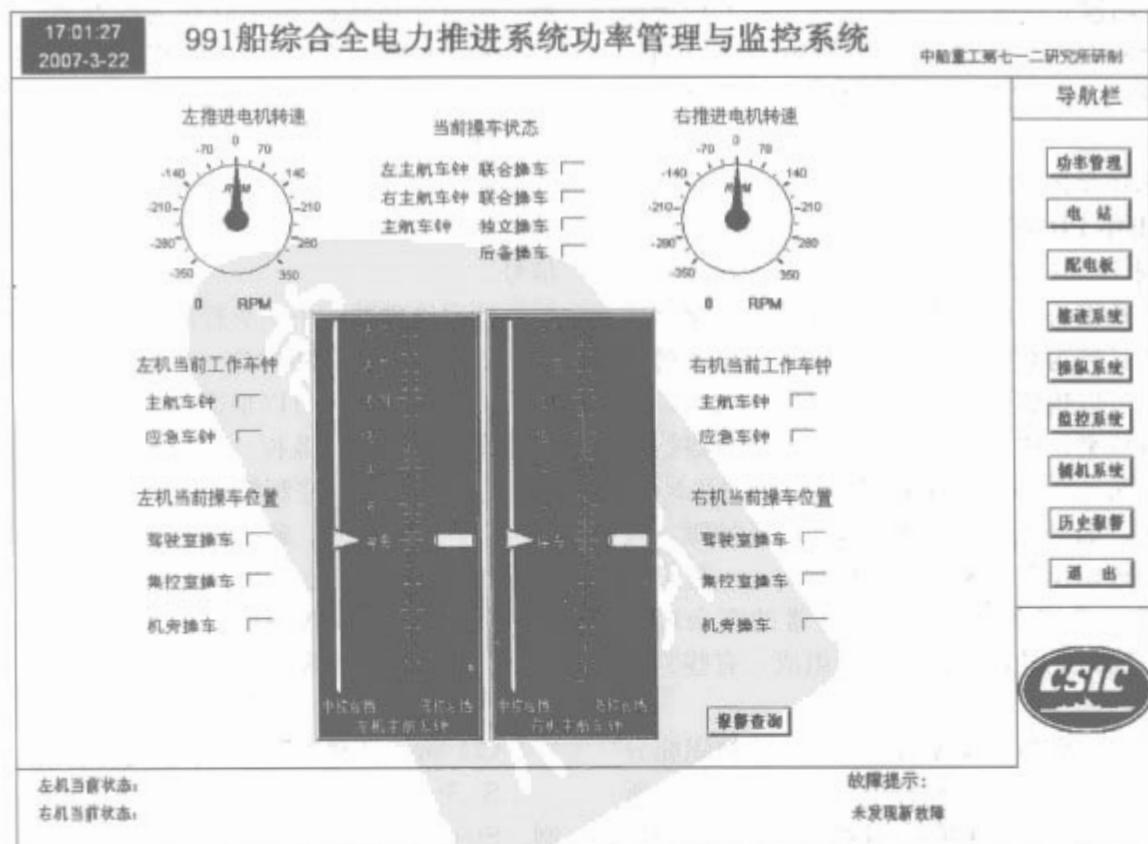


图 5.6-5 991 电力推进监控系统实时监控主界面

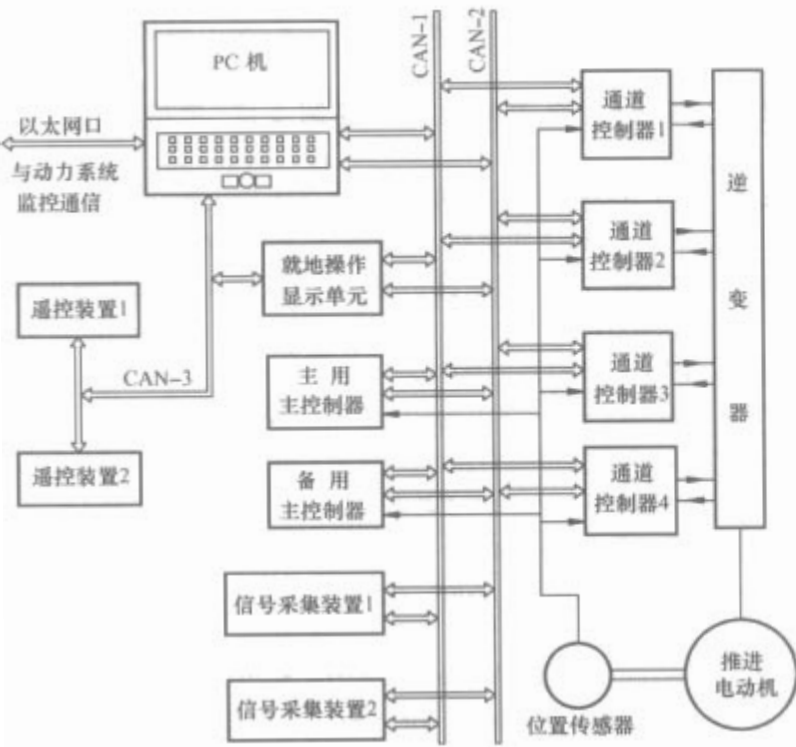


图 5.6-6 多相推进电机控制系统原理框图

控装置不能作为 CAN-1 和 CAN-2 的节点，另外设计 CAN-3 用于遥控装置与就地操作显示单元及 PC 机之间通信，遥控装置与其他单元之间的通信由操作显示单元或 PC 机转发。考虑遥控装置与操作显示单元或监控计算机之间的距离不会超过 1km，故选择其波特率为 50kbit/s。为了提高可靠性，CAN 总线 and 主控制器进行冗余设计。

表 5.6-5 CAN 总线系统任意两个节点之间的最大距离

位速率 (kbit/s)	1000	500	250	125	100	50	20	10	5
传输距离 (m)	40	130	270	530	620	1300	3300	6700	10 000

信号采集装置 1 和信号采集装置 2 分别采集电机和变流器的参数，PC 机实现对控制系统的命令控制和数据显示和储存，主要控制功能有发送命令给下位机并从下位机接收相关数据、发送设定值启动和停机命令，进行系统运行参数显示、故障报警指示，完成监控功能。



参 考 文 献

- [1] 马国华. 监控组态软件及其应用. 北京:清华大学出版社,2001
- [2] 何克忠、李伟. 计算机控制系统. 北京:清华大学出版社,1999
- [3] 郭银景、吕文红、唐富华、杨阳. 电磁兼容原理及应用. 北京:清华大学出版社,2004
- [4] 邓志良. 船舶供配电网络监控器设计. 海军工程学院学报,1996
- [5] 李晓华、尹项根、张哲、胡文平. 基于面向对象的舰船电力监控系统. 舰船电力推进技术专题论文集,2000
- [6] Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion, Alf Kåre Ådnanes ABB AS Marine,2003-04-22
- [7] Reconfigurable Marine Control Systems and Electrical Propulsion Systems for Ships, Dr. Asgeir J. Sørensen and Dr. Alf Kåre Ådnanes, February 16-18, 2005
- [8] Hardware-in-the-loop testing of marine control systems, Roger Skjetne and Olav Egeland, February 16-18, 2005
- [9] International Symposium on Superconducting Magneto-hydrodynamic Ship Propulsion, Proceedings, JAPAN, October, 1991
- [10] D W. Swallow, et al. Magneto-Hydrodynamic Submarine propulsion System. Naval Engineers Journal, Vol. 103, No. 3, May, 1991
- [11] D. W. Cott, Annular DC MHD Thrusters for Submarines, 27th Symposium on Engineering Aspects of MHD, Reno, NV, June 27-29, 1989
- [12] A. D. Appleton. World Cryogenic Technique -Development of Superconductivity Application at IRD. Cryogenics, Vol19, NO. 7, P371~374,1979
- [13] 外冈幸吉. 超电导的电力推进系统. 日本船用机关学会志, Vol116, NO. 11, P962~971,1981
- [14] Wenqi Ge, Shaodong Tang, Luquang Yan, et al. Development and Test of a 300KW Superconducting Homopolar Generator. IEEE Tran on Mag, vol32, No. 4,1996
- [15] E. F. Meehan, C. J. Mole. Superconducting Electric Propulsion Systems for Advanced Ship Concept. Naval Engineers Journal, Vol184, No6,1972
- [16] 唐绍栋. 高温超导交流同步电机. 中国科技发展论坛. 北京:国防工业出版社,2005
- [17] Kalsi, S. Karon. Compact Light Weight Ship Propulsion Motor. Presented at the Ship Propulsion Systems Conference London, UK 2002. 2. 21~22
- [18] 电机工程手册(第二版). 电机卷,机械工业出版社,1997
- [19] 辜承林,陈乔夫,熊永前. 电机学,华中科技大学出版社,2001
- [20] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统,机械工业出版社,1992
- [21] 许大中,贺益康,电机控制,浙江大学出版社,2002
- [22] 黄俊. 半导体变流技术,机械工业出版社,1980
- [23] 许建安主编. 继电保护整定计算,中国水利水电出版社,2001
- [24] IEEE Std 519-1992
- [25] Control in an Information Rich World, Report of the Panel on Future Directions in Control, Dynamics, and Systems, 30 June 2002
- [26] Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion, Alf Kåre Ådnanes ABB AS Marine, 22 April 2003
- [27] Reconfigurable Marine Control Systems and Electrical Propulsion Systems for Ships, Dr. Asgeir J. Sørensen and Dr. Alf Kåre Ådnanes, 16-18 February 2005
- [28] Hardware-in-the-loop testing of marine control systems, Roger Skjetne and Olav Egeland, 16-18 February 2005
- [29] 何恩广. 变频牵引电机绝缘系统新构想. 绝缘材料,2002
- [30] 陆宝驹. 交流变频电机的绝缘. 绝缘材料,2001
- [31] 中国交流电机调速传动学术年会论文集,武汉:船电技术编辑部出版,1999. 10
- [32] 陈国呈. 新型电力电子变换技术. 中国电力出版社,2004
- [33] 李志民,张遇杰. 同步电动机调速系统. 北京:机械工业出版社,1996
- [34] Bimal K. Bose. 现代电力电子学与交流传动. 机械工业出版社,2005
- [35] International Symposium on Superconducting Magneto-hydrodynamic Ship Propulsion, Proceedings, JAPAN, October, 1991
- [36] Rolls-Royce fact sheet. Bird-Johnson AWJ-21™. www.rolls-royce.com,2006
- [37] Description and Service Manual for KaMeWa Waterjet 71SIL Rolls-Royce, 2005
- [38] 金平仲. 船舶喷水推进. 北京:国防工业出版社,1988
- [39] John Allison, Marine Waterjet Propulsion J. SNAME Transactions, 1993, 101: 275~335
- [40] Pump-jet, From Wikipedia, the free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org/wiki/Pump-jet>, 2006. 10
- [41] Hans Klein Woud, Douwe Stapersma. Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems. The Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2002

第6篇 船舶机械电气控制

主编单位：中国船舶重工集团公司第七〇四研究所

海军工程大学

主 编：焦 侏 宋哲仁 马伟明 胡 安

编写人员：焦 侏(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

宋哲仁(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

马伟明(海军工程大学)

胡 安(海军工程大学)

徐姝青(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

谢跃敏(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

夏海红(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

茅一峰(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

夏金妹(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

徐安昌(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

黄 宇(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

魏绍锋(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

洪术华(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

王 飞(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

鲁军勇(海军工程大学)

第 1 章 船舶电气传动与控制

船舶电气传动与控制的使命是把电能转换成机械能，以实现船舶机械设备的工作过程电气化与自动化。

1 船舶电气传动及控制的基本要求

1.1 技术性能及船级社规范要求

船舶电气传动与控制设备（以下文中均称“电气设备”）应确保相应船舶机械完成既定的生产工艺，不但要有足够的负载能力，而且要有必要的运行速度、响应速度、控制精度和平稳性。

电气设备应视其船舶航行水域的不同接受有关规范和规则的约束。这些规范和规则主要有：国际海事组织 IMO；国际海上人命安全公约 SOLAS；国际船级社联合会 IACS；国际标准化组织 ISO；国际电工委员会 IEC；中国船级社 CCS；美国船级社 ABS；英国劳氏船级社 LR；德国劳氏船级社 GL；法国船级社 BV；日本海事协会 NK；挪威船级社 DNV；俄罗斯船级社 MRS。

1.2 环境条件要求

电气设备应能适应船舶环境条件，并在相应条件下正常工作。

1.2.1 船舶环境参数组分类及其严酷程度分级

安装在船上的电气设备将因其具体船舶船型的不同、工况的不同、航行水域的不同和安装部位的不同而承受不同环境条件的制约。为了便于设计者合理选用电气设备的结构、减振措施、材料、元器件表面处理工艺和防护措施，IEC-721-3-0 和 GB/T 4798.6-1996 分别给出了气候环境条件（K）、生物环境条件（B）、化学活性物质（C）、机械活性物质（S）、机械环境条件（M）为数有限的一些等级（详见 GB/T 4798.6-1996）。对一个具体产品，应引用一组完整的

等级，如：6K3/6B1/6C2/6S2/6M3。

最低的等级组合 6K1/6B1/6S1/6C1/6M1 是安装在非机械推进船舶并有气候防护部位的产品将承受的环境条件。最高等级 6K5/6B2/6C3/6S3/6M4 的组合适用于在大部分类型船舶且环境很严酷部位安装的产品。

一个等级的环境条件往往包括一些等级较低的严酷程度数据。对某些环境参数，目前还不能给出定量的严酷等级。

1.2.2 电气设备的外壳防护

电气设备的外壳防护应符合船级社规范的要求。电气设备采用何种防护等级，是由电气设备的安装位置决定的。各安装位置中电气设备防护等级的最低要求可见表 6.1-1。表示防护等级的标志由特征字母 IP 及其后面加的两两位数字组成。

1.2.3 电气设备的防爆措施

在易燃易爆蒸汽、气体易于积聚或扩散到的爆炸危险场所，原则上不应敷设电缆和安装电气设备。如若必须敷设电缆时则一定要采用穿密封钢管的办法加以保护，电气设备应选用防爆电气设备和采取防爆措施。

船舶爆炸危险区域划分为三类，其划分原则及所在部位应用举例见表 6.1-2。

电气设备的防爆型式应与安装处所的危险区域类别相适应，见表 6.1-3。

船舶上所用任何防爆电气设备均要国家防爆检验机构测试认可，并出具生产许可证。经国家防爆检验机构测试认可的防爆电气设备的铭牌上应有“EX”标记。这些设备同时应符合船用环境条件。

1.3 对电流电压和频率波动的适应要求

电气设备应保证在表 6.1-4 中所规定的电压和频率偏离额定值的波动情况下可靠工作。

表 6.1-1 防护等级及防护性能

序号	防护型式	允许代用 IP 等级	防护性能	适用场所
1	防护式	IP21	—	—
2	防滴式	IP22	电气设备倾斜 15°时，水滴垂直落下，对设备无有害影响	一般舱室
3	防滴式	IP23	电气设备倾斜 45°时，水滴垂直落下，对设备无有害影响	一般舱室
4	防溅式	IP44	从任何方向设备外壳溅水应无有害影响	潮气、蒸汽、油雾、尘埃等明显积聚或有溅水的场所
5	防水式	IP56~IP57	猛烈的海浪冲击对设备无有害影响	露天甲板或类似场所
6	水密式	IP58	电气设备在规定的深度（压力）和时间下，浸在水中了对设备无有害影响	船舶水线以下有可能淹没在水中工作场所
7	潜水式	无	电气设备在规定的深度（压力）下，长期地浸在水中了对设备无有害影响	设备需长期处于水下工作或不工作场所

表 6.1-2 危险区域划分

危险区域分类	定 义	船舶部位应用举例
0 类	正常工作条件下，持续或长期存在爆炸性混和气体的区域	货油舱（喷气燃料）
1 类	正常工作条件下，可能产生或积聚爆炸性混和气体的区域	货油泵舱、喷气燃料空隔舱、蓄电池室、油漆间、弹药舱、直升机机库距甲板以上 0.5m 范围内
2 类	正常工作条件下，不大可能产生或积聚爆炸性混和气体的区域，即使产生或聚集也只存在很短时间	距任何货油舱口或气体蒸汽出口 3m 范围之内的露天甲板区域或露天甲板上半封闭处所，综合补给船的液货补给作业区

表 6.1-3 电气设备的防爆型式

危险区域类别	0 类	1 类	2 类
防爆型式	本质安全型	本质安全型 (ia) (ib) 隔爆型 (d) 正压型 (p) 增安型 (c)	1 类危险区 允许的防爆型式及无火花型 (n)

1.4 电磁兼容性要求

电气设备在船舶电磁场环境中应能与其他系统相互兼容，并能正常地运行和工作。电气设备运行时不应对其他系统设备的正常工作产生超过允许值的电磁骚扰，同时有电子组件的敏感电气设备还应具有足够的抗电磁干扰的能力。电磁骚扰条件见第 1 篇第 3 章。

由于不同类型的电气设备有各自的特点，故对其电磁兼容性的要求也各不相同，表 6.1-5 列出了一些典型电气设备应进行电磁兼容性试验的项目。为了使电气设备满足电磁兼容要求，应通过合理、适用的电磁兼容设计。设计中采用抑制电磁干扰的主要方法有接地、隔离、屏蔽和加滤波等。一般情况下，抑制传导干扰的电容器和滤波器应接在交流电气设备的相线之间，而不接在相线与地之间，若必须接在相线与地之间，则要求对 50Hz 的电气设备，每根相线对地电容不大于 0.1μF；对 400Hz 的电气设备应不大于 0.02μF。

表 6.1-5 典型电气设备应做电磁兼容性试验项目

试验项目 设 备	骚扰测量		抗扰度试验					
	传导骚扰	外壳端口 辐射骚扰	静电 放电	射频电磁 场辐射	电快速瞬 变脉冲群	浪涌	低频传导	射频场效应 的传导骚扰
交流电机	✓	✓						
直流电机	✓	✓						
变频、调宽、整流 (可控) 及其附属设备	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
无电子器件的 断路器、接触器								
继电器控制的 控制设备						✓		
计算机及其 外围设备	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
上列以外的 其他电气设备	视具体情况而定							

表 6.1-4 允许电压和频率偏离额定值之值

设 备	参 数	稳态(%)	瞬 态	
			(%)	恢复时间(s)
一般设备	电压波动	+6~-10	±20	1.5
	频率波动	±5	±10	5
由蓄电池供电的设备				
充电间接于蓄电池者	电压波动	+30~-25	—	—
充电期间不接于蓄电池者	电压波动	+20~-25	—	—

1.5 电气安全性要求

电气设备的设计必须充分考虑到船员的人身安全和机械设备的安全。

1.5.1 电气设备的安全设计、选材及安装

(1) 电气设备的设计必须保证设备在按规定安装和使用，不得发生任何危险。必须能够承受在正常使用中可能出现的物理和化学的影响。如果在安全技术和经济利益之间发生矛盾时，应该优先考虑满足安全技术上的要求。

(2) 电气设备的设计应考虑设备运行时使用人员和操作人员的人身安全，包括尽可能减少在设备操作和维护中可能发生的人为失误。

(3) 在符合功能要求和预期运行条件下，电气设备应具有最简单的设计，经最低限度训练的操作人员就能进行操作、维护和修理。

(4) 电气设备的设计和结构应使船员在操作和维修时遭到电击的可能性最小, 对可能危及船员安全的运动部件应加装防护措施。

(5) 为防止操作而引起的危险或设备损坏, 电气设备内部相互间或设备之间应设有联锁装置, 某些运动部件还应有极限电气、机械双重保护, 以确保安全。

(6) 电气设备或系统的设计应能使设备、系统或其部件在安装、调换时可以切断电源。当设备主电源开关断开电源后, 所有控制电路包括指示灯都不得带电。

(7) 电气设备内部走线、应尽可能将主电源线和控制信号线相互隔离。

(8) 电气设备的结构和元件安装应安全可靠、易于检查、维修和调换元件。在正常情况下, 使用人员触及不到带电部件, 而电气元器件运行过程中产生的电弧和火花不应危及人身安全, 也不影响其他电器元件的正常工作。

(9) 电气设备所选用的绝缘材料及电线电缆应是具有足够机械强度和绝缘强度, 并是低烟、无卤、滞燃、高温时不产生有毒气体的材料。

1.5.2 电气间隙和爬电距离

电气设备内各电气回路或任何电气回路与地之间的电气间隙和爬电距离应符合表 6.1-6 的规定。

表 6.1-6 电气间隙和爬电距离允许最小值

交流或直流电压 (V)	额定容量 (VA)	电气间隙 (mm)	爬电距离 (mm)	
			开启式外壳	封闭式外壳
≤64	≤50	1.6	1.6	1.6
	>50~2000	3.2	3.2	3.2
	>2000	3.2	13.0	9.5
>64~150	≤50	1.6	1.6	1.6
	>50~2000	3.2	6.4	3.2
	>2000	6.4	19.0	9.5
>150~300	≤50	1.6	1.6	1.6
	750~2000	3.2	6.4	3.2
	>2000	6.4	19.0	13.0
>300~600	≤50	1.6	3.2	3.2
	>50~2000	3.2	6.4	6.4
	>2000	6.4	19.0	13.0
>600~1000	≤50	3.2	13.0	9.5
	750~2000	6.4	25.0	19.0
	>2000	12.0	51.0	38.0

注 印刷板导线间距一般不小于 1.0mm。

1.5.3 绝缘电阻

电气设备在环境温度 15~35℃, 湿度 20%~80% 的条件下, 各电路带电部件之间和带电部件与地之间的绝缘冷态电阻应不小于 10MΩ, 热态绝缘电阻应不小于 5MΩ, 湿热试验后的绝缘电阻应不小于 1MΩ。

1.5.4 介电强度

表 6.1-7 介电强度测试条件

序号	额定绝缘电压(U _i)(V)	试验电压(V)
1	12<U _i ≤60	500
2	U _i >60	2U _i +1000(但不少于 1500)

电气设备的绝缘应能承受表 6.1-7 规定的工频试验电压(有效值), 历时 1min 应无击穿或闪络现象。

1.5.5 接地保护

电气设备应有可靠的接地保护措施, 不论正常使用或故障情况下都应保证接地保护电路的有效性, 保证所有裸露的金属零件、金属外壳在任何时候相对于船体是零电位。一般采用铜质螺栓可靠接地, 并要带有明显的接地标志。接地导线应采用黄绿多芯铜线或专用编制导线。接地螺栓最小尺寸应符合表 6.1-8 要求。

表 6.1-8 接地螺栓最小尺寸

序号	装置的额定电流 (A)	接地螺栓最小尺寸 (mm)
1	<200	M6
2	201~630	M8
3	630~1000	M10
4	>1000	M12

接地导线截面积应符合表 6.1-9 要求。

表 6.1-9 接地导线截面积

序号	装置导体截面积 (铜) S (mm ²)	接地导线的最小截面积 (铜) a (mm ²)
1	≤2.5	≥1.5
2	2.5~120	a=S/2≥4
3	>120	≥70

1.6 可靠性要求

可靠性是衡量电气设备性能好坏的一个重要指标。通常在系统或设备的技术规格书或合同里都会明确提出可靠性定量要求, 如常用的平均故障间隔时间 MTBF [见式 (6.1-1)] 和平均维修时间 MTTR [见式 (6.1-2)]

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \tag{6.1-1}$$

式中: N 为在规定使用期间出现故障的全部次数; $\sum_{i=1}^N t_i$ 为所有无故障工作时间之和, 以小时计。

$$MTTR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_i \tag{6.1-2}$$

式中: N 为全部维修次数; $\sum_{i=1}^N \Delta t_i$ 为所有维修时间之和, 以小时计。

为了达到设备所要求的可靠性指标, 必须在设计、研制、生产及使用等各个阶段制定周密的可靠性计划, 进行严格的可靠性管理、设计和试验。其中可靠性设计是可靠性技术中最为关键的一环, 为提高电气设备的可靠性可参照表 6.1-10 进行设计。

表 6.1-10 电气设备可靠性设计要点

序号	项目	提高可靠性的要点
1	元器件选择	(1) 选择 MTBF 值高的元器件 (2) 加大安全系数, 降低元器件使用强度(如降低定额使用, 减小元器件工作时承受的电压、电流、温升等), 从而可使 MTBF 低的元器件提高设备的 MTBF 值 (3) 对元器件进行老化筛选处理, 剔除 MTBF 值小的元件

续表

序号	项目	提高可靠性的要点
2	接触件、接插件	(1) 对接触器、继电器、行程开关之类可提高触点工作电压、电流等级,一般选用 48V 以上电压 (2) 电压过低可电流很小的场合,应选用密封触点或金质触点 (3) 接插件选用镀金、镀银的铜质接插件,并可多芯并联使用
3	系统结构	(1) 采用分级系统或分散装置 (2) 采用冗余技术,重要部位可采用两种或多种元器件或子系统来完成同一功能 (3) 采用快速切换的冷储备子系统或热储备子系统
4	故障报警显示和诊断	(1) 采用完善的故障显示报警装置,及时发现故障部位或原因,便于迅速处理故障 (2) 采用自诊断系统,对系统适时地进行检测和诊断,实现故障的预测和预报
5	系统的保护	尽量完善系统的保护,限制和缩小故障范围,易于进行处理
6	环境	充分考虑到船用环境的特殊性(温度、湿度、盐雾、霉菌、机械环境条件、电磁场等)针对不同的条件采取必要的防护措施

2 电动机的选择

2.1 选择电动机的基本思路

(1) 船舶电气传动系统中,电动机的选择,首先考虑的是在某种工作制下电动机功率的选择。所选电动机功率应有余量,其负荷率一般取 0.8~0.9。过大的备用功率会使电机效率降低,对于感应电动机而言,其功率因数也将变坏,并使按电动机最大转矩校验强度的机械结构造价提高,因而极不经济。反之,如果功率选小了。电动机将长期处于超负荷运行以致造成电动机过早损坏。确定电动机功率时主要考虑电动机的发热、允许过载能力和起动能力三个方面,这其中发热问题最为重要。

(2) 根据船舶机械在技术与经济方面的要求选择电动机的电流种类(直流电、交流电、相数)和电压等级。这里所说技术方面主要是指船舶电网电压、频率标准和对功率因数的要求等,经济方面主要是指要求所选设备尽可能质量轻、体积小、效率高、价格低、维修方便等。

(3) 根据船舶生产机械的最高转速和对电气传动调速系统的调速范围、调速精度、过渡过程品质要求,以及机械减速器机构的复杂程度,选择电动机的额定转速及调速方式。

(4) 根据机械传动安装要求选择电动机是立式、卧式、单出轴或双伸轴型式。

(5) 根据船舶机械所处环境条件,如温度、湿度、盐雾、霉菌、冲击、振动、易燃易爆气体、海浪、灰尘、雨水、冰雪等选择电动机的冷却方式、结构型式和防护措施。

(6) 除上述考虑之外,还必须让选择的电动机满足电磁兼容和符合节能要求,并充分考虑到运行可靠性、设备的供货情况、备品备件通用性、安装检修的难易、以及产品价格、运输和维修费用等等因素。

2.2 几种主要船用电动机分类及性能特点

几种主要船用电动机分类及性能特点见表 6.1-11。

表 6.1-11 几种船用电动机的主要性能特点

电机种类		主要性能特点
直流电动机	他励	机械特性硬、起动转矩大、调速性能好、要有直流电源、结构比较复杂,维修性较差,造价较高
	并励	同“他励”
	复励	机械特性软硬适中,起动转矩大、调速方便,要有直流电源,结构比较复杂,维修性较差、造价高
三相异步电动机	普通笼型异步电动机	机械特性硬、起动转矩不太大,可以调速、结构简单、维修方便、造价低、交流电源供电
	高起动转矩笼型异步电动机	有高转差式、深槽式、双笼型式、交流电源供电结构比较复杂,起动转矩大,维修性比较好
	多速笼型异步电动机	机械特性硬,多速(2~4速),变速(有级)方便,维修性好
	绕线转子异步电动机	机械特性硬,启动转矩大,调速方法多,调速性能好,维修性好,结构比较复杂,造价较高
三相同步电动机		转速不随负载变化,功率因数可调,交流电源供电变频调速性能好。结构较之异步电机复杂,造价较高,维修性好
单相异步电动机		功率小,通常在 0.5kW 以下,机械特性硬,交流供电,结构简单,维修方便,造价低廉

2.3 电气传动的基本运动方程式

当电动机接通电源后,便可产生电磁转矩使电机转起来,并向转轴拖动的生产机械输出机械功率。最简单的电气传动是电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连,电动机与负载同轴、同转速,如电动机直接与风机、油泵等的直联。而实际的电气传动系统中,大多数是电动机通过传动机构,如通过齿轮减速器,通过钢丝滑轮组等与工作机构相连。工程上为了简化多轴系统的计算分析,通常把负载转矩及系统飞轮转矩折算到电机轴上来,变多轴系统为单轴系统。其系统中的电磁转矩、负载转矩与转速之间的关系可用式(6.1-3)运动方程式描述

$$T_M - T_L = J d\omega/dt = (GD^2/375) dn/dt \quad (6.1-3)$$

式中: T_M 为电动机转矩, $N \cdot m$; T_L 为已折算至电动机轴上的负载转矩, $N \cdot m$; $J = m\rho^2 = GD^2/4g$ 为转动惯量, $kg \cdot m$; m 为物体质量, kg ; ρ 为物体对转动轴的回转半径, m ; GD^2 为物体的飞轮力矩, $N \cdot m^2$; G 为物体的重力, N ; $D=2\rho$ 为回转直径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ω 为电动机角速度, rad/s ; $d\omega/dt$ 为电动机角加速度, rad/s^2 ; n 为电动机转速, r/min ; dn/dt 为电动机加速度, r/min^2 ; 系数 375 为具有加速度量纲, m/s^2 。

2.4 船舶机械的负载特性

船舶机械的负载转矩 T_L 随转速 n 的变化而变化的特性 $T_L=f(n)$ 称为负载特性,除任何机械在作变速运动时都具有的惯性负载外,通常把船舶机械的负载特性归纳为三种类型,见表 6.1-12。

表 6.1-12 船舶机械负载特性曲线

特性类型	特 性 特 征	示 意 图	应 用 范 例
反应性 负载	负载转矩 T_L 在一定条件下总保持恒定，并永远阻碍电动机的运动。其方向与速度方向有关，即其极性随着运动方向改变而改变；但其数值与速度、行程等与工作过程因素有关，一般分为恒转矩和恒功率负载两种。有静摩擦转矩存在		布缆机、铺管机、水平输送机、海上补给等
位势性 负载	负载转矩 T_L 在一定状态下保持恒定，为恒转矩负载。位势负载在速度方向改变时保持原来的作用方向。因而在一定旋转方向下阻碍电动机运动而在相反的旋转方向下促进运动，其数值与速度方向无关		起重机、电梯、起艇机、吊杆等
流体 负载	负载转矩 T_L 由气体、液体的摩擦阻力产生，这种机械一般只在一种旋转方向下工作。负载转矩的大小在一定转速范围内与转速 n 的二次方大致成正比		风机、水泵、油泵、舵桨、侧推装置等

2.5 船舶机械的工作制

船舶机械和通用机械一样有三种工作制，即长期工作制、短期工作制和重复短期工作制。

(1) 长期工作制，是指生产机械长期恒速（或变化不大）运行。根据负载施加方式的不同又可分为：

1) 平稳负载工作制——负载转矩长时间不变或变化不大，例如风机、水泵、油泵等。这类机械对电气传动装置的要求简单，只要求有足够的功率和起动转矩就行。

2) 波动或重复短时负载长期工作制——负载长期施加，但大小波动或周期性重复施加。如工程船上的一些特种机械，这类机械除要求电气传动装置有足够功率和起动转矩外，还要求有足够的过载转矩，甚至较长时间堵转。

(2) 短期工作制，是指生产机械较长时间间隔起停或加减速一次就完成一个工作循环，例如起艇机械。这种机械要求电动机的起动和过载转矩大于负载转矩（发热校验一般不成问题）。短期工作制的生产机械对起、制动（或加减速）时间和行程有要求，需有足够的加、减速动态转矩。

(3) 重复短期工作制，是指生产机械周期性的起停或加减速，间隔较短，例如提升机械、客货电梯等。它除了要求有足够的起制动转矩以满足机械对加减速时间或行程的要求和过载能力外，还要进行发热校验。

2.6 电动机的工作制

对应于生产机械的各种工作制，按 GB 755—2000 标准将传动电动机的工作制分为 S1~S10 共 10 类，这 10 类工作制中，工作制 S1 可以按照电动机生产许可证连续额定作长期运行。对于工作制 S2，电动机应在实际冷状态下起动，并在规定的时限内运行。短时定额的时限一般规定为 10min、30min、60min 或 90min，视电机而定。

对于工作制 S3 和 S6，每一工作周期的时间为 10min。

对于 S3、S4、S5、S6 和 S8 等五种工作制，负载持续率为 15%，25%，40% 和 60%。

对于 S4、S5、S7 和 S8 等 4 种工作制，每小时的等效起动次数一般分为 150、300 和 600 次，并应给出电动机的转

动惯量 J_m 和折算到电动机轴上的全部外加转动惯量 J_{ext} 之值，也可以 GD^2 表示。

2.7 电动机的发热与温升

电动机的发热与温升见表 6.1-13。

表 6.1-13 电动机的发热与温升

项 目	意 义 说 明
损耗与发热	电动机运行过程中有能量损耗，可以分为固定损耗和可变损耗。固定损耗包括铁耗和机械损耗，与负载无关，一般电动机此项数字较小，可变损耗主要是铜损，它与电枢电流的平方成正比例。这两种损耗都导致发热
电机的温升	发热达到热平衡时电机温度与环境温度之差称电机的温升 $Qdt = Cdr + A\tau dt$ 式中：Q 为单位时间内电动机所产生的热量 ($Q = \Delta P$)，kJ/s； ΔP 为电动机功率损耗；C 为电动机热容量，即电动机温度升高 1℃，所需热量，kJ/℃；A 为电动机的散热率，即电动机与周围环境温度相差 1℃ 时，单位时间内散发到周围空气中的热量 kJ/(s·℃)； τ 为电动机温升，℃。 在 $t=0$ $\tau=\tau_{P0}$ 时初始条件下 $\tau = \tau_L + (\tau_{P0} - \tau_L) e^{-\frac{t}{T_0}}$ $\tau_L = \theta/A$ $T_0 = C/A$ 式中： τ_L 为电动机温升稳定值，℃； T_0 为电动机发热时间常数，s。 可以看出，温升按指数规律随时间的增加而逐渐趋于稳定值。 Q 的大小主要取决于铜损 (I^2R)，既主要取决于负载的大小， T_0 与电机的构造尺寸有关。小型电动机一般为 0.5h 左右，大型电动机一般为 3~4h。电机的冷却时间常数为发热时间常数的 2~3 倍，采用强迫通风时，两者相等
电动机的热平衡方程式	
电动机发热过程和冷却过程的温升曲线	<p>电动机发热过程温升曲线 电动机冷却过程的温升曲线 τ—温升；τ_L—稳态温升； τ_{P0}—起始温升；t—发热或冷却时间</p>

2.8 电动机的机械特性

几种常见船用电动机的机械特性见表 6.1-14。

2.9 电动机功率计算的基本公式

2.9.1 电动机容量计算

电动机容量计算公式见表 6.1-15。

2.9.2 飞轮力矩的计算

几种常见几何形状物体的飞轮力矩计算公式见表 6.1-16。

表 6.1-14 几种常用船用电动机的机械特性

类 型	特 性 公 式	符 号	特 性 曲 线	性 能
交流电动机	<div>$P=m_1 u_1 I_1 \cos\varphi$$T=\frac{m_1}{\omega_s} \frac{u_1^2 r_2' s}{(r_1 s+r_2')^2+s^2 x_k^2}$$s_{cr}=r_2'/\sqrt{r_1^2+x_k^2}$$x_k=x_1+x_2'$$T_{cr}=\frac{m_1 u_1^2}{2\omega_s (\sqrt{r_1^2+x_k^2}-r_1)}$$T=\frac{2T_{cr}(1+q)}{\frac{s}{s_{cr}}+\frac{s_{cr}}{s}+2q}$$s_{cr}=(\lambda_T+\sqrt{\lambda_T^2+1})$$T_s=\frac{m_1}{\omega_s} \frac{u_1^2 r_2'}{(r_1+r_2')^2+x_k^2}$$s=(\omega_s-\omega)/\omega_s$$\omega_s=2\pi n_s/60$$n_s=60f_1/p$$q=r_1/\sqrt{r_1^2+x_k^2}$<p>大型电动机的 γ_1 很小，可以忽略，则有</p>$s_{cr}\approx r_2'/x_k$$\lambda T=T_{cr}/T_N$$T_{cr}\approx m_1 u_1^2/2\omega_s x_k$$T\approx \frac{2T_{cr}}{\frac{s}{s_{cr}}+\frac{s_{cr}}{s}}$$T_s\approx \frac{m_1}{\omega_s} \frac{u_1^2 r_2'}{r_2'^2+x_k^2}$</div>	<div>P——电动机功率，kW m_1——相数 U_1——定子相电压，V I_1——定子相电流，A $\cos\varphi$——功率因数 T——电磁转矩，N·m r_1——定子相电阻，Ω r_2'——折算到定子侧的转子相电阻，Ω x_1——定子电抗，Ω x_2'——折合到定子侧的转子电抗，Ω x_k——短路电抗，Ω s——转差率 s_N——额定转差率 s_{cr}——临界转差率 λ_T——转矩过载倍数 T_N——额定转矩，N·m T_{cr}——临界转矩，N·m T_s——起动转矩，N·m ω——角速度，1/s ω_s——同步角速度，1/s n_s——同步转速，r/min f_1——供电频率，Hz p——磁极对数 q——系数</div>	<div><p>自然特性</p><p>不同转子电阻 (U_1=常数)</p><p>不同电源电压 (R_2=常数)</p><p>各种运行状态</p><p>不同极对数</p><p>不同供电频率 (当 U_1/f_1 常数)</p></div>	<div>(1) 笼型异步电动机简单、耐用、可靠、易维护、价格低、特性硬，但起动和调速性能差、轻载时功率因数低。一般无调速要求的机械广泛采用。在可变频率电源供电下可平滑调速。变极数多速电动机可分段变速，但体积大，价格较贵</div> <div>(2) 绕线转子异步电动机：因有集电环，比笼型异步电动机维护麻烦，价格也稍贵，转子串电阻的特性属软特性。随负载转矩的增加，电机转速显著下降，但它起动转矩大，起动时功率因数高，且可进行小范围的速度调节，控制设备简单，故广泛采用于各种生产机械，尤其是用于电网容量小，起动次数多的机械，如升降机、电梯、起重机等。变频调速范围宽平滑</div>

续表

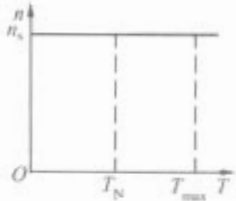

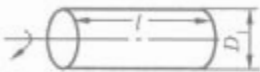
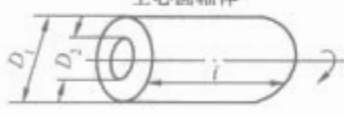
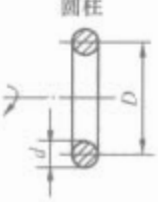
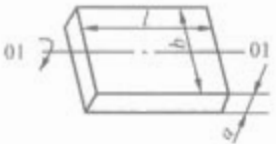

类 型		特性公式	符 号	特性曲线	性 能
交流电动机	同步电动机	$n_s=60f/p$ $T_s=\frac{9.55m_1u_1E_0}{n_sx_s\sin\theta}$ $T_{\max}=\frac{9.55m_1u_1E_0}{n_sx_s}$	E_0 ——空载电动势, V θ ——电动势与电压的相角差 T_s ——同步转矩, N·m x_s ——同步电抗, Ω		一般不调速, 也可变频调速, 速度由供电频率决定
	直流电动机	$E=k_e\Phi n=C_e n$ $k_e=pN/60\alpha$ $T=k_T\Phi I_a=C_m I_a$ $K_T=k_e/1.03$ $n=\frac{u_1-I_a(R_a+R)}{k_e\Phi}$ $n_s=u/k_e\Phi$ $n=\frac{u}{k_e\Phi}-\frac{R_a+R}{k_e k_T \Phi^2} T$ $T_N=9550\frac{P_N}{n_N}$	E ——反电动势, V Φ ——磁通, Wb k_e ——电动机电动势结构常数 k_T ——电动机转矩结构常数 N ——电枢绕组的导体总数 α ——电枢绕组的支路对数 I_a ——电枢电流, A u ——电枢电压, V T ——电磁转矩, N·m R_a ——电枢电阻, Ω R ——电枢回路附加电阻, Ω T_N ——额定转矩, N·m T_L ——负载转矩, N·m P_N ——额定功率, kW C_e ——电动机电动势常数 C_m ——电动机转矩常数	 	调速性能好, 范围宽, 采用电子控制下, 能充分适应各种机械负载的需要。但它的价格贵, 维护复杂, 尤其在海洋环境条件需要经常对集电环保养, 且需要直流电源, 因此只在交流电动机不能满足要求时才采用, 目前船上已较少采用 串励直流电动机的特点是起动转矩大, 过载能力大, 特性软, 适用于电力牵引机械和起重机等 复励直流电动机的起动转矩和过载能力比并励直流电动机大, 但调速范围稍窄, 接成积复励时, 适用于起动转矩很大、负载具有强烈变化的设备上

表 6. 1-15 电动机容量计算公式

名 称	公 式	符 号
1. 功率	$P = T_M n_M / 9550$ $P = FV / \eta \times 10^{-3}$ $P = T_m \omega_m / 1000$	P ——电动机功率, kW T_M ——电动机转矩, N·m n_M ——电动机转速, r/min ω_M ——电动机角速度, rad/s F ——作用力, N V ——运动速度, m/s η ——传动效率
2. 运动物体的动能	$\omega_M = \pi n_M / 30$ $E = mV^2 / 2$ $E = J\omega^2 / 2$ $E = GD^2 n^2 / 7200$	E ——运动物体的动能, J m ——物体的质量, kg J ——转动惯量, kg·m ² GD^2 ——飞轮力矩, N·m ²
3. 折算到电动机轴上的静阻负载转矩	$T_L = T_m (1/i\eta)$ $T_L = F \cdot v / \omega_M \eta$ $T_L = FR / i\eta$ $i = n_M / n_m$	T_L ——电动机轴上的静阻负载转矩, N·m T_m ——机械轴上的静阻转矩, N·m R ——物体运动的旋转半径, m i ——传动比 n_m ——机械轴转速, r/min
4. 折算到电动机轴上的转动惯量和飞轮转矩	$J = J_m / i^2$ $GD^2 = GD_m^2 / i^2$ $GD^2 = 365 Gm V_m^2 / n_D^2$ $GD^2 = 4gJ$ $GD^2 = GD_m^2 + \frac{GD_{m1}^2}{i_1^2} + \frac{GD_{m2}^2}{i_2^2} + \dots + \frac{GD_{mn}^2}{i_n^2}$ $i_1 = \frac{n_M}{n_{m1}}, i_2 = \frac{n_{m1}}{n_{m2}} \dots$ $i_n = \frac{n_M}{n_{mn}}$	J_m ——机械轴上的转动惯量, kg·m ² GD_m^2 ——机械轴上的飞轮转矩, N·m ² g ——重力加速度, m/s ² Gm ——直线运动物体的重力, N V_m ——直线运动物体的速度, m/s GD_m^2 ——电动机转子飞轮转矩, N·m ² $GD_{m1}^2, GD_{m2}^2, \dots, GD_{mn}^2$ ——相应于转速 $n_{m1}, n_{m2}, \dots, n_{mn}$ 轴上的飞轮转矩 i_1, i_2, \dots, i_n ——各轴对电动机轴的传动比
5. 电动机起动时间 (1) 动态转矩恒定下起动(加速)时间 时间制动(减速)时间 (2) 起动转矩线性变化下 (3) 动态转矩非恒定、也非线性变化时	$t_s = \frac{GD^2 (n_1 - n_2)}{375 (-T_d)}$ $T_d = T_M - T_L$ $t_b = \frac{GD^2 (n_1 - n_2)}{375 (-T_d)} - T_d = - (T_M + T_2)$ $t_s = \frac{GD^2 (n_2 - n_1)}{375 (T_{M1} - T_{M2})} l_n \frac{T_{M1} + T_2}{T_{M2} + T_2}$ $t_b = \frac{GD^2 (n_2 - n_1)}{375 (T_{M1} - T_{M2})} l_n \frac{T_{M1} + T_2}{T_{M2} + T_2}$ $t'_s = (GD^2 / 375) \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{dt} (T_d > 0 \text{ 时加速})$ $t_b = (GD^2 / 375) \int_{n_2}^{n_1} \frac{dn}{dt} (T_d < 0 \text{ 时减速})$	t_s ——起动(加速)时间, s t_b ——制动(减速)时间, s T_d ——动态(加减速)转矩, N·m 

表 6. 1-16 常见几何形状物体的飞轮力矩

物体及几何	飞轮力矩计算公式	符号及单位
<div>实心圆轴体</div> 	$GD^2 = GD_1^2 / 2 = (\pi / 8) g r l D_1^4$	GD^2 ——飞轮力矩, $N \cdot m^2$ G ——重力, $G = mg, N$ D_1 ——外径, m r ——密度, kg/m^3 l ——长度, m D_2 ——内径, m D ——圆环直径, m d ——环切面直径, m a ——厚度, m b ——宽度, m ρ ——回转半径, m g ——重力加速度, m/s^2 m ——质量, kg
<div>空心圆轴体</div> 	$GD^2 = G(D_1^2 + D_2^2) / 2$ $= (\pi / 8) g r l (D_1^4 - D_2^4)$	
<div>圆柱</div> 	$GD^2 = G(D^2 + 0.75d^2)$ $= (\pi^2 / 4) g r \cdot (D^3 d^2 + 0.75 D d^4)$	
<div>六面体 (对轴线01-01)</div> 	$GD_{01}^2 = G(a^2 + b^2) / 3$ $= [(a^2 + b^2) / 3] g r a b l$	
<div>六面体 (对轴线02-02)</div> 	$GD_{02}^2 = GD_{01}^2 + 4G\rho^2$	

2. 9. 3 机械传动效率平均值

常见数种机械传动效率平均值见表 6. 1-17。

表 6. 1-17 常见数种机械传动效率平均值

传动装置	效率 η
齿轮传动(圆锥形圆柱形、伞形)一般数据	0. 96~0. 98
圆柱形齿轮传动	
(1)磨制过的正齿轮	0. 99
(2)车削加工的正齿轮	0. 98
(3)精加工的正齿轮	0. 96
(4)人字齿轮	0. 985
伞齿轮减速器	0. 97~0. 98
链条传动	0. 98
摩擦传动	0. 7~0. 8
滑轮传动($\mu=0. 1$)	
(1)螺纹角为 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$	0. 41
(2)螺纹角为 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$	0. 55
(3)螺纹角为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$	0. 66
钢丝绳传动	0. 90
带传动	0. 94~0. 98
V带传动	0. 90
纯索及链条滑车	0. 96
纯索及链条卷筒	0. 94~0. 96
复式滑车	0. 92~0. 98
支座轴颈	0. 99
滚动轴承	0. 97
滑动轴承	0. 94
滑动轴承但润滑不良	0. 98
带油环润滑	

2. 10 电动机选择校验

2. 10. 1 过载能力校验

电动机的过载能力是指转矩过载和电流过载两个方面。对交流电动机,主要考虑转矩过载不致引起最大转矩的颠覆;对直流电动机,主要考虑电流过载不致引起换向的恶化。过载能力的表达式如式(6. 1-4)和式(6. 1-5)所示

$\lambda_T = T_{max} / T_N$ (6. 1-4)

$\lambda_I = I_{max} / I_N$ (6. 1-5)

式中: λ_T 为转矩过载倍数; λ_I 为电流过载倍数; T_{max} 为最大转矩, $N \cdot m$; T_N 为额定转矩, $N \cdot m$; I_{max} 为最大电流, A ; I_N 为额定电流, A 。

船用电动机的过载能力见表 6. 1-18。

表 6. 1-18 船用电动机过载能力

电动机类型	系列	转矩过载倍数 λ_T	电流过载倍数 λ_I
一般用途	Y-H	2. 1~1. 8(功率小,转速高的偏大)	
	ZzC	1. 6(2min)	2(1min)
起重	JZx-H	单速 2. 8;双速 2(高)/2(低); 三速 2(高)/2. 5(中)/2~2. 8(低)	
	YHLQ-H	双速 2. 6(高)/2. 4(低); 三速 1. 9(高)/2(中)/2. 4(低)	
	IPB2	单速 2;双速/2. 2(中)/2. 1(低); 四速—/2(中)/1. 4~2(低)	

续表			
电动机类型	系列	转矩过载倍数 λ_T	电流过载倍数 λ_I
起重	IPB2	三速——/2.3(中)/2.3(低) 四速——/2.4(中)/2.3(低)	—
	ZZH ZZKH 复励	3.5	3(1min)
	ZZH ZZKH 并励	2.5	2.8(1min)
	ZZY-H 复励	3.5	2.8(1min) (2级火花)
	ZZY-H 并励	3	2.6(1min) (2级火花)
	ZZY-H 串励	4	3(1min) (2级火花)

对直流起重电动机,还有起动转矩过载能力问题,其值比在额定电流及额定转速下的过载能力还要大。直流电动机在削弱磁场后过载能力将有所减小。

交流和直流起重电动机系列均具有不同的负载持续率(FC)定额的规格,应注意在不同的负载持续率时其过载能力也不同。因为 $P_{15\%}>P_{25\%}>P_{40\%}>P_{100\%}$, 所以 $\lambda_{15\%}<\lambda_{25\%}<\lambda_{40\%}<\lambda_{100\%}$ 。一般无特别说明时, λ 均是指 25% 负载持续率的过载倍数。

2.10.2 容许发热校验

根据发热基本理论,物体产生的热量应等于物体储藏的热量加上发散的热量。因此,物体均匀加热时的热态方程式见式(6.1-6)

$$\tau=\tau_s(1-e^{-t/T})+\tau_0e^{-t/T} \tag{6.1-6}$$

式中: τ 为加热开始后 t min 时物体超过周围介质的温升, K; τ_0 为开始时的温升, K; τ_s 为发热稳定时的温升, K; T 为发热时间常数, min; t 为电动机工作时间, min。

稳定温升 τ_s 决定于式(6.1-7)

$$\tau_s=Q/A \tag{6.1-7}$$

式中: Q 为物体中每秒钟内产生的热量, J/s; A 为散热率, 当物体与周围介质有 1K 的温度差时, 在 1s 内从物体全部面积散出的热量 [J/(s·K)]。

电动机运行时与静止时的散热率对采用自扇冷却的电动机有所不同。

图 6.1-1 为按式(6.1-17)升温的发热曲线。其中曲线 I 表示 $\tau_0=0$ 的发热曲线即式(6.1-17)中的第一部分; 曲线 II 表示 $Q=0$, 即停止发热后从 τ_0 开始的冷却曲线, 即式(6.1-17)中的第二部分。

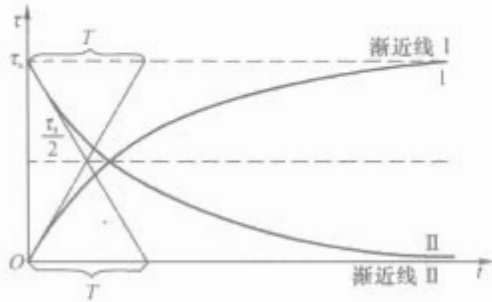


图 6.1-1 物体发热曲线

从图中可知, 发热时间常数 T 为物体加热而不向外散热时达到稳定温升的时间。实际上由于存在散热, 只能达到 $0.632\tau_s$ 的温升。要经过 $4T\sim5T$ 的时间, 才可近似认为达到了稳定温升。如果发热与散热的时间常数相等, 则曲线 I 和曲线 II 是互为镜像。

电动机的发热时间常数实际上不是恒定的, 特别是在发热的起始阶段。发热时间常数与电动机的结构尺寸有极大关系, 电动机的通风方式、结构类型直接影响散热效果。一般, 体积大和散热率小的电动机的发热时间常数较大。小型电动机一般为 0.5h 左右, 大型电动机一般分 3~4h。采用强迫通风时发热与冷却时间常数相等, 不采用强迫通风时冷却时间常数为发热时间常数的 2~3 倍。常用船用电动机的发热时间常数:

直流防滴式、交流防护式为 25~90min。

交流封闭式为 11~22min。

起重用防水封闭式为 65~270min。

各种电动机具有不同的绝缘结构与绝缘等级, 每种绝缘均有一个最高允许工作温升, 各级绝缘的温升标准见表 6.1-19。

表 6.1-19 船用电动机最大允许温升 (环境温度 45℃)

电动机系列	ZC2			YH	JZ2-H	YHLQ-H	ZZH ZZKH	ZZY-H
	E	B	F	B	B	H	B	H
电动机部件								
电枢、并励绕组	75	80	100	80	85	85	95	125
整流子	70	80		—	—	—	85	100
轴承	50	50		50	50	50	50	50

注 电枢、并励绕组均用电阻法测量, 整流子、轴承均用温度计法测量。

2.10.3 容量校验

(1) 恒定负载连续工作制下电动机(S1 工作制)的校验根据负载转矩及转速, 计算出所需的负载功率 P_L , 选择电动机的额定功率 P_N (kW) 应略大于 P_L 。计算公式见式(6.1-8)和式(6.1-9)

$$P_N>P_L=T_Ln_N/9550 \tag{6.1-8}$$

式中: T_L 为计算到电动机轴上的负载转矩, N·m; n_N 为电动机额定转速, r/min。

当负载转矩恒定且需要在电机基速以上调速时, 其额定功率(kW)应按所需最高工作转速计算

$$P_N\geq T_Ln_{max}/9550 \tag{6.1-9}$$

式中: n_{max} 为电动机的最高工作转速, r/min。

对起动条件严酷(静阻转矩较大或带有较大飞轮力矩)而采用笼型异步电动机或同步电动机传动的场合, 在初选电动机的额定功率和转速后还要按式(6.1-10)和式(6.1-11)分别校验起动过程中的最小转矩和允许的最大飞轮力矩, 以保证生产机械能顺利地起动和起动过程中的电动机不致过热。

电动机的最小起动转矩见式(6.1-10)

$$T_{max}\geq T_{Lmax}K_s/K_u \tag{6.1-10}$$

式中: T_{Lmax} 为起动过程中可能出现的最大负载转矩, N·m; K_s 为保证起动时有足够加速转矩的系数, 一般取 $K_s=1.15\sim1.25$; K_u 为电压波动系数, 即起动时电动机端电压与额定电压之比, 全压起动时 $K_u\approx0.85$ 。

允许的最大飞轮力矩 GD_{km}^2 见式 (6.1-11)

$$GD_{\text{mec}}^2 \leq GD_{\text{km}}^2 = GD_0^2 \left(1 - \frac{T_{\text{Lmax}}}{T_{\text{sav}} k_u^2} - GD_{\text{m}}^2 \right) \quad (6.1-11)$$

式中: GD_{mec}^2 为折算到电动机轴上传动机械的最大飞轮力矩, $\text{N} \cdot \text{m}^2$; GD_0^2 为包括电动机在内的整个传动系统所允许的最大飞轮力矩, 折算到电动机轴上的数值, 由电机资料查取; GD_{m}^2 为电动机转子的飞轮力矩, $\text{N} \cdot \text{m}^2$; T_{sav} 为电动机的平均起动转矩, $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

(2) 短时工作制下电动机 (S2) 的校验, 短时工作制下, 同样可以按式 (6.1-10) 或 (6.1-11) 计算出所需要的负载功率, 然后选择具有适当工作时间的短时定额电动机。如果没有合适的短时定额电动机, 也可以选用断续定额电动机。计算电动机功率 (kW) 时, 应考虑其过载能力, 对于异步电动机应满足式 (6.1-12)

$$P_N \geq \frac{P_{\text{Lmax}}}{0.75\lambda} \quad (6.1-12)$$

式中: P_{Lmax} 为短时负载功率的最大值, kW; λ 为电动机的转矩过载倍数。

(3) 变动负载连续工作制电动机 (S6、S7、S8) 的校验, 如图 6.1-2 所示的变动负载连续周期工作制下电动机的发热校验, 可以分为两个步骤。先按等效 (均方根) 电流法或等效转矩法, 计算出一个周期 T_c 内的等效电流 I_{rms} 或等效转矩 T_{rms} 即应满足式 (6.1-13) 或式 (6.1-14) 要求

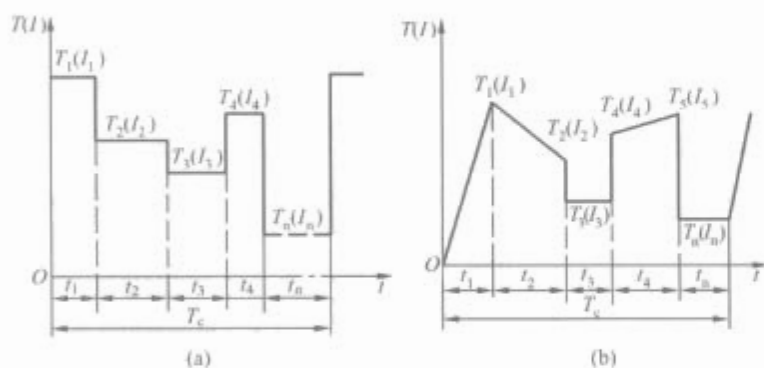


图 6.1-2 变动负载连续周期工作制电动机的负载图
(a) 矩形负载; (b) 梯形或三角形负载

$$I_N \geq I_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i / T_c} \quad (6.1-13)$$

$$\text{或} \quad T_N \geq T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n T_i^2 t_i}{T_c}} \quad (6.1-14)$$

式中: I_N 为周期工作制电动机的额定电流, A; T_N 为周期工作制电动机的额定转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; I_{rms} 为一个周期 T_c 内的等效电流, A; T_{rms} 为一个周期 T_c 内的等效转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; I_i 为一个周期 T_c 内各分时间的电流, A; T_i 为一个周期 T_c 内各分时间的转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; t_i 为一个周期 T_c 内各分时间, s; T_c 为一个周期总时间, 即

$$T_c = \sum_{i=1}^n t_i (s)$$

当负载如图 6.1-2 所示为三角形或梯形时, 则应将每一分段时间内的电流或转矩换算成等效平均值后, 同样用式 (6.1-13) 或式 (6.1-14) 计算, 如对应梯形负载时间 t_2 (内电流或转矩) 的等效平均值为式 (6.1-15) 或式 (6.1-16) 所示

$$T_{\text{av2}} = \sqrt{\frac{T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2}{3}} \quad (6.1-15)$$

$$\text{或} \quad I_{\text{av2}} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}} \quad (6.1-16)$$

对应时间 t_1 内三角形曲线电流 (或转矩) 的平均值为式 (6.1-17) 和式 (6.1-18) 所示

$$T_{\text{av1}} = \sqrt{T_1^2 / 3} \quad (6.1-17)$$

$$I_{\text{av1}} = \sqrt{I_1^2 / 3} \quad (6.1-18)$$

上三式中: I_{av} 为等效平均电流, A; T_{av} 为等效平均转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

根据 I_{rms} (或 T_{rms}) 选取电动机的额定值后, 还要用最大负载转矩校验电动机的过载能力, 具体见式 (6.1-19)

$$T_N \geq \frac{T_{\text{Lmax}}}{0.9 k_u \lambda_T} \quad (6.1-19)$$

式中: T_N 为电动机额定转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_{Lmax} 为最大负载转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; k_u 为电网电压波动对电动机转矩影响的系数, 一般对同步电动机取 $k_u = 0.85$, 对异步电动机取 $k_u = 0.72$, 对直流电动机取 $k_u = 1.0$; λ_T 为电动机转矩过载倍数 (见表 6.1-30)。

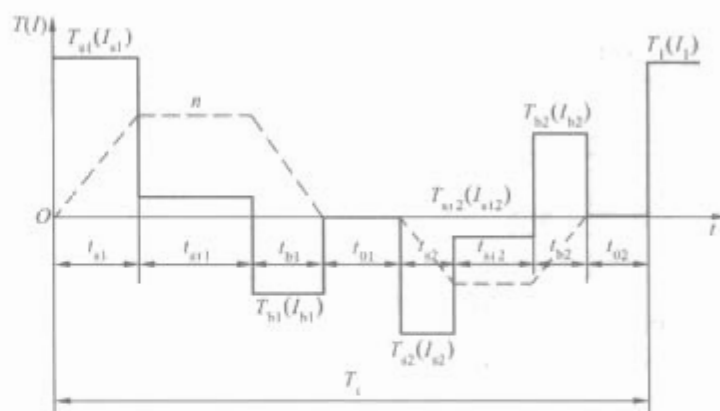


图 6.1-3 重复短时工作制电动机的速度和负载图

(4) 断续周期工作制电动机 (S3、S4、S5 工作制) 的校验, 对于 S3、S4、S5 断续周期工作制 (如图 6.1-3 所示), 应尽量选用断续定额电动机。所选用的负载持续率额定值 FC_N , 应尽量接近实际工作条件下的 FC 值; 当实际工作的 FC 值大于 60% 时, 可采取强迫通风或选用连续定额电动机。

断续工作制下, 电动机的校验可采用等效电流 (或等效转矩) 法。

1) 选用断续定额电动机, 其等效电流按式 (6.1-20) 计算

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum I_s^2 t_s + \sum I_{st}^2 t_{st} + \sum I_b^2 t_b}{C_u (\sum t_s + \sum t_b) + \sum t_{st}}} \quad (\text{A}) \quad (6.1-20)$$

等效转矩按式 (6.1-21) 计算

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum T_s^2 t_s + \sum T_{st}^2 t_{st} + \sum T_b^2 t_b}{C_u (\sum t_s + \sum t_b) + \sum t_{st}}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (6.1-21)$$

2) 选用连续定额电动机, 其等效电流, 等效转矩按式 (6.1-22) 和式 (6.1-23) 计算

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum I_s^2 t_s + \sum I_{st}^2 t_{st} + \sum I_b^2 t_b}{C_u (\sum t_s + \sum t_b) + \sum t_{st} + C_\beta \sum t_o}} \quad (\text{A}) \quad (6.1-22)$$

$$T_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum T_s^2 t_s + \sum T_{st}^2 t_{st} + \sum T_b^2 t_b}{C_u (\sum t_s + \sum t_b) + \sum t_{st} + C_\beta \sum t_o}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (6.1-23)$$

式中: T_s 为起动转矩, $N \cdot m$; I_s 为起动电流, A ; T_b 为制动转矩, $N \cdot m$; I_b 为制动电流, A ; T_{st} 为稳态运转转矩, $N \cdot m$; I_{st} 稳态运转电流, A ; Σt_s 为一个周期中起动时间的总和, s ; Σt_b 为一个周期中制动时间的总和, s ; Σt_{st} 为一个周期中稳态运行时间的总和, s ; Σt_0 为一个周期中停歇时间的总和, s ; C_a 为电机起动、制动过程中散热恶化系数 $C_a = (1 + C_p)/2$; C_p 为停止时电动机散热恶化系数见表 6.1-20。

表 6.1-20 电动机散热恶化系数 C_p 值

电动机的冷却方式	C_p	电动机的冷却方式	C_p
封闭式电动机 (无冷却风扇)	0.95~0.98	封闭式电动机 (自带内冷风扇)	0.45~0.55
封闭式电动机 (强迫通风)	0.9~1	防护式电动机 (自带内冷风扇)	0.25~0.35

对于笼型异步电动机和绕线转子异步电动机及恒定励磁的并(他)励直流电动机,采用等效电流(或等效转矩)法均可;但对于串励直流电动机和利用变励磁调速的直流并(他)励电动机则只能采用等效电流法。

表 6.1-21 船舶机械常用电动机系列

类别	系列	名称	容量范围 (kW)	转速范围 (r/min) 或极对数 p	结构形式及性能	应用范围
交流异步电动机	Y-H	船用三相异步电动机	0.5~315 5.5~250	750~3000 750~3000	IP44 全封闭自扇冷, 有较好的起动性能 IP23 防护或自扇冷	舱室机械
	YB-H	船用隔爆式三相异步电动机	0.55~90	750~3000	隔爆 dⅡ BT4 级自扇冷	危险区舱室机械
	YPB1-H	船用起重三相异步电动机	—	4/12 <i>p</i> 30/10min 4/8/16 <i>p</i> 10/30/5min	IP56 自冷却防水型, 可装直流圆盘式安全型电磁制动器, 轴承采用单列向心轴承	电动起锚机 电动系泊绞车 电动绞缆车
	YPB2-H	船用起重三相异步电动机	—	4/6 <i>p</i> 25%或 30min	—	起重机、缆绳绞车、救生艇绞车
	YPB3-H	船用起重三相异步电动机	—	4/8 <i>p</i> 10/30min	—	电动救助艇
	YPB4-H	船用起重三相异步电动机	—	8 <i>p</i> 10min	—	舷梯绞车、舱口盖绞车
	YPB5-H	船用起重三相异步电动机	—	8 <i>p</i> 10min 或 40%	—	电动稳索、千斤索绞车
	JZ _z -H	船用起重三相异步电动机	单速 1.5~18.5 双速 3/1.2~18/5 三速 7.5/7.5/2~85/85/60	4, 6, 8 <i>p</i> 4/12, 4/16 <i>p</i> 4/8/16 <i>p</i>	25% 30/15min 10/30/5min 防水式自冷、带圆盘制动器	甲板机械
	IPB1	船用起重异步电动机	单速 11~16 三速 2.7/5.8/12~7/14.5/30 四速 4/4.2/9/9~61/65/135/135	8 <i>p</i> 16/8/4 <i>p</i> 16/16/8/4 <i>p</i>	40% 5/15/15% 2/5/30/10min 防水式自冷带圆盘制动器	甲板机械
	YHLQ-H	船用起货机恒力矩异步电动机	双速 7.3/3.7 三速 44/22/5.2	4/8 <i>p</i> 4/8/24 <i>p</i>	25/25%防水式自冷 25/25/25%防水式强风冷; 带圆盘制动器	起货机
	YZF ₂ -H	船用起货恒功率异步电动机	双速 10/3 三速 38/26/4.5~54/37/6	4/12 <i>p</i> 4/8/24 <i>p</i>	25/15% 15/20/15% 防水式强风冷带圆盘制动器	起货机

实际的负载持续率 FC_s 值按式 (6.1-24) 计算

$$FC_s = [(\Sigma t_s + \Sigma t_b + \Sigma t_{st}) / T_c] \times 100\% \quad (6.1-24)$$

当求出的 FC_s 值与所选电动机额定的负载持续率 FC_N 值不相等(但相差不多)时,应将上述公式计算出的 I_{rms} (或 T_{rms}) 值(A)折算到与所选电动机的 FC_N 值下相等效的数值,见式 (6.1-25) 或式 (6.1-26)

$$I'_{rms} = \sqrt{FC_s / FC_N} I_{rms} \quad (6.1-25)$$

或
$$T'_{rms} = \sqrt{FC_s / FC_N} T_{rms} \quad (6.1-26)$$

如果求出的 FC_s 值与所选 FC_N 相差较大,例如实际算出的 FC_s 值为 35%,而所选电动机定额 FC_N 为 25%,则应再选 $FC_N=40\%$ 的额定值,重新进行校验。

当选取的电动机额定转矩 $T_N \geq T'_{rms}$, 或额定电流 $I_N \geq I'_{rms}$ 时,若再按式 (6.1-29) 校验最大过载转矩也能通过,则可以采用所选电动机。

2.11 船舶用电动机系列及应用范围

船舶机械常用电动机系列及应用范围见表 6.1-21。

续表

类别	系 列	名 称	容量范围 (kW)	转速范围 (r/min) 或极对数 p	结构形式及性能	应用范围
交流异步电动机	IPB2	船用起货机异步电动机	三速 4.1/19/38 四速 4.1/19/38/38	28/8/4 p 28/8/4/2 p	25/25/25% 25/25/25/10% 防水式强风冷带圆盘制动器	起货机
	YPB4	舱用重吊起货机异步电动机	三速 6.8/29/61 三速 6.5/40/80 四速 6.5/40/80/80	36/12/6 p 28/8/4 p 28/8/4/2 p	15/15/15% 15/15/40% 15/15/20/20% 防水强风冷带圆盘制动器	起货机
	JYZC	舰船用低噪声三相异步电动机	7.5~90	1480, 2930~2970	IP23 防护自扇冷, 噪声低于 75dB	舱室机械
	YD-H	船用变极多速三相异步电动机	0.65/0.85~13/16 0.45/0.75~11/17	6/4 p , 8/4 p	双速全封闭自扇冷	需变速的舱室机械
	YZR	起重用绕线转子异步电动机	1.5~110 (40%)	586~970	封闭式自冷	特种起重机械
直流电动机	Z ₂ C	船用直流电动机	0.4~200	600~3000	防滴式自扇冷	舱室机械
	Z ₀₂ C	船用直流电动机	0.4~6.5	750~3000	封闭式自扇冷	露天安装的舱室机械
	ZZY-H	船用直流起重电动机	1.9~40	640~1600 分低速高速 两个系列	防水式自冷带圆盘制动器, 有不同的工作制	甲板机械
	ZZH	船用直流起重电动机	7~42	630~1050	防水式自冷带圆盘制动器, 有不同的工作制	甲板机械
	ZZKH	船用直流起重电动机	9~56	1000~1250	防水式自冷带圆盘制动器, 有不同的工作制	甲板机械
	ZDH	船用大中型直流起重电动机	160, 185, 200 320 780 1250	600 190 500	防滴式强风冷	特种机械

3 电动机的起动、制动及调速方式选择

3.1 电动机的起动

电动机的起动方式一般分为直接起动和减压起动。起动时应满足下述条件:

- 1) 起动时, 对电网造成的电压降不超过规定的数值, 一般要求经常起动的电动机在起动时不得导致本船电网的电压降超过 10%。
- 2) 起动功率不超过供电设备和电网的过载能力。
- 3) 电动机的起动转矩应大于传动机械的静阻转矩。
- 4) 起动时, 应保证电动机及相应起动设备的动稳定和热稳定性。

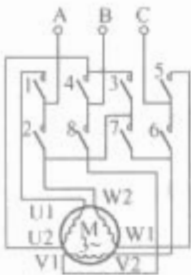
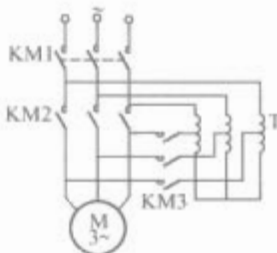
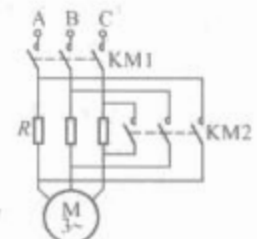
3.1.1 笼型异步电动机的起动

笼型异步电动机是一种结构简单、坚固耐用、使用可靠、方便维修、价格低廉的电动机。缺点是起动电流大、轻载时功率因数低。

笼型异步电动机应优先采用直接起动。一般船舶允许小于 25% 电网容量的电动机直接起动。当不允许直接起动时可考虑降压起动。

- 1) 直接起动。
- 2) 接通电流峰值(最大值) $I_s = 2\sqrt{2}I_m$, I_m 为起动电流。
- 3) 一般用途电动机的起动电流 $I_m \approx (5.5 \sim 7)I_n$ 。
- 4) 起重型电动机的起动电流 $I_m \approx (2 \sim 2.5)I_n$ (低速绕组); $I_m \approx (4 \sim 6)I_n$ (高速绕组)。
- 5) 在起动瞬间 1~2 个周期内 $I_m \approx (8 \sim 13)I_n$ 。
- 6) 电动机的空载电流 $I_0 \approx (0.95 \sim 0.20)I_n$ 。
- 7) 以上 I_n 为电动机的额定电流。
- 8) 起动时间 T_m , 在正常条件下 $T_m < 10s$, 在重载起动时 $T_m > 10s$ 。
 - (1) 星—三角联结减压起动: 星—三角转换必须在电动机正常运转时为三角形联结法的电动机方可采用。Y-H 系列船用电动机在功率为 4kW 及以上者全部为三角形联结, 可适用于星—三角降压起动。
 - (2) 自耦变压器减压起动: 适用于起动较大容量的电动机。
 - (3) 定子串电阻减压起动: 电动机起动时在三相定子电路中串联电阻。
 - (4) 笼型异步电动机各种起动方式比较见表 6.1-22。

表 6.1-22 笼型异步电动机各种起动方式比较

起动方式	全压起动	星—三角减压起动	自耦变压器减压起动			三相串电阻减压起动
			减压百分数			
			80%	65%	50%	
起动电压 U_s	1	0.58	0.8	0.65	0.5	0.8
额定电压 U_N						
起动转矩	1	0.33	0.64	0.43	0.25	0.64
全压起动转矩						
起动电流	1	0.33	0.64	0.43	0.25	0.8
全压起动电流						
起动电路图	—	 <p>起动时 Y 接线， 触头 1、8、5、3、7 闭合； 起动时 Δ 接线，触 头 1、2、5、6、4、 8 闭合</p>	 <p>起动时 KM1 和 KM3 闭合； 起动后 KM1 和 KM2 闭合</p>	 <p>起动时 KM1 闭合； 起动后 KM1 和 KM2 闭合</p>		
适用场所	高压、 低压电 动机	绕组额定电压 380V，具有 6 个出线头， 正常运行时为三角联结的电动机	高压、低压电动机	低压电动机		
特点	起动方 法简便， 起动电流 和起动压 降较大	起动电流小、起动转矩小	起动电流较小、起动转矩较大	起动电流较大，起动转矩较小。 起动过程电阻中消耗电能较大		

3.1.2 绕线转子异步电动机的起动

绕线转子异步电动机是一种转子具有绕组和滑环结构的电动机。一般采用电阻分级起动或频敏变阻器起动两种方式, 实际上这两种方式都是绕线转子电动机的降压起动方式。前者起动转矩大, 但控制较复杂且起动电阻体积大, 维修麻烦; 而后者具有恒转矩的起、制动特性, 又是静止元件, 很少需要维修, 因此除下列情况外, 绕线转子异步电动机多采用频敏变阻器起动:

- 1) 有低速运转的传动装置。
- 2) 要求利用电动机的过载能力, 承担起动转矩的传动装置。
- 3) 开始起动转矩很大的传动装置。

3.1.2.1 转子串电阻分级起动

在绕线转子异步电动机的三相转子回路中分别串接起动电阻或电抗器, 一般为 2~4 级起动, 其控制线路见图 6.1-4 和图 6.1-5。

方案 1 是通过欠电流继电器设定值来控制电阻的切除, 方案 2 是通过时间继电器的定时设定来控制电阻的切除。

3.1.2.2 转子串频敏变阻器起动

频敏变阻器实际上是一个铁心损耗非常大的三相电抗器。频敏变阻器的阻抗能够随着转子电流频率的下降而减小, 常用于较大容量的绕线转子异步电动机的起动控制。对偶尔起动用频敏变阻器可采用起动后用接触器短接的控制方

式, 如图 6.1-6(a)所示, 对于重复短时工作的频敏变阻器, 可常接在转子回路中, 如图 6.1-6(b)所示。

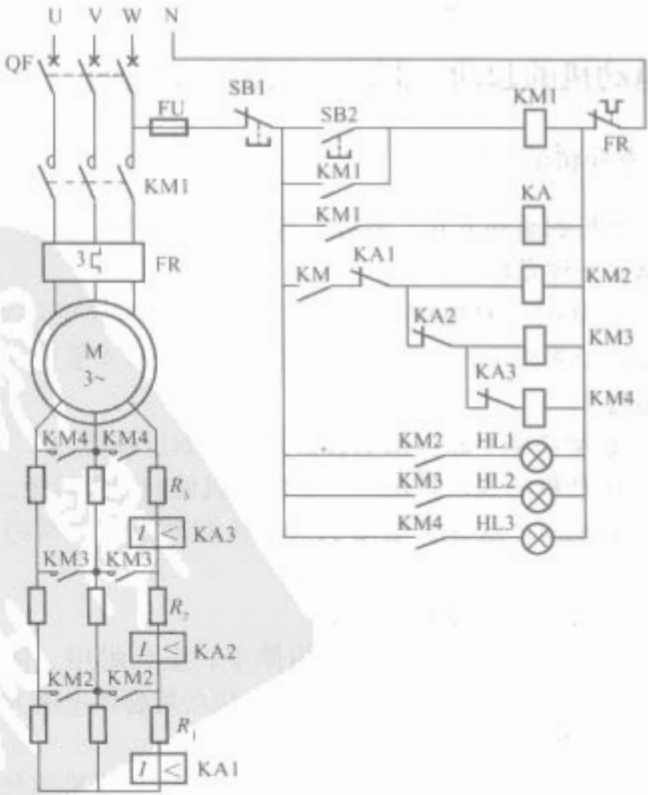


图 6.1-4 转子电路串电阻减压
起动控制线路(方案 1)

频敏变阻器的铁心与铁轭间设有气隙，在绕组上面有几组抽头，改变气隙 δ 和绕组匝数 N 便可调整电动机的起动电流和起动转矩特性如图 6.1-7 所示。

频敏变阻器的主要性能参数见表 6.1-23。

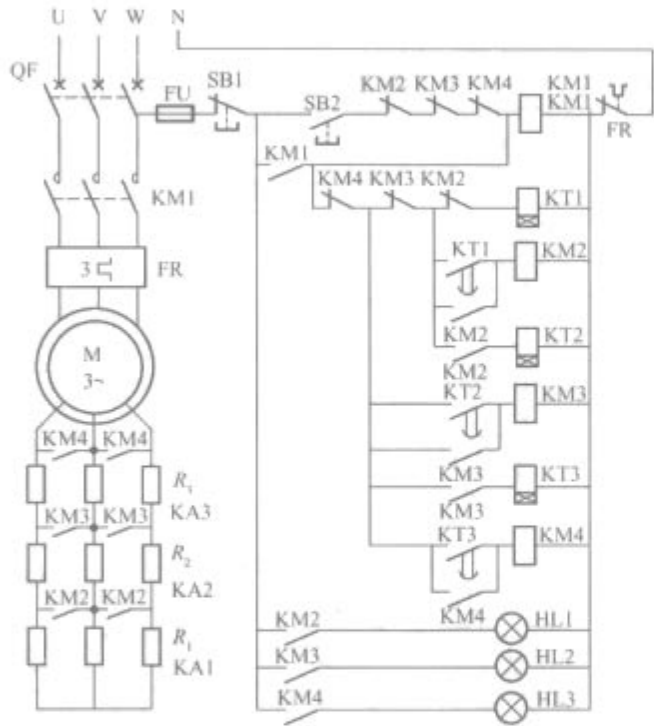


图 6.1-5 转子电路串电阻减压
起动控制线路(方案 2)

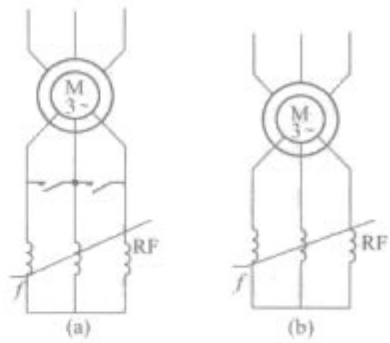


图 6.1-6 频敏变阻器接线
(a)起动后切除；(b)常接在转子回路中

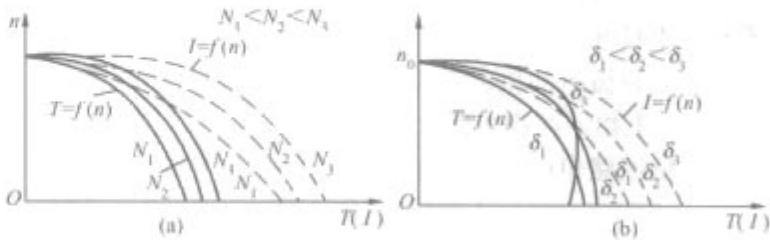


图 6.1-7 改变频敏变阻器匝数 N 和气隙 δ 时的特性
(a)改变匝数 N ；(b)改变气隙 δ

表 6.1-23 频敏变阻器性能参数

系列	用途	负载分类	负载特性	性能				功率范围(kW)
				起动时负载 转矩倍数	起动转 矩倍数	起动电 流倍数	总起动 时间(s)	
PB1 PB6	偶尔 起动	轻载	GD^2 小, 负载小	0.1~0.5	0.7	1.25~1.6	80	22~2240
		重轻载	GD^2 大, 负载不大	0.5~0.7	1	1.6~2	120	
		重载	GD^2 不大, 负载大	0.6~1	1.2	2~2.5	120	
BP1 BP4	重复 短时 周期	第一类	$z < 250/h$ $t_s z < 400s$	0.2~0.8	1~1.3	1.6~2.5		2~125
		第二类	$z < 400/h$ $t_s z < 630s$					
		第三类	$z < 630/h$ $t_s z < 1000s$					
		第四类	$z > 630/h$ $t_s z < 1600s$					

表中 $t_s z$ 值为每小时起动次数 z (起动一次算一次, 反按制动一次算三次, 动力制动一次算一次) 与每次起动时间 t_s 的乘积。无规则操作或操作极频繁的电动机, 由于每次起动不一定升至额定转速, 在设计中一般可取 $t_s = 1.5 \sim 2s$ 。

3.1.3 交流电动机的软起动

在一些对起动要求较高的场合, 可选用软起动装置, 它采用电子起动方式, 其基本原理是利用晶闸管的移相调压方式来控制起动电压和起动电流。其主要特点是: 具有软起动和软停车功能, 起动电流、起动转矩可调节, 同时具有电动机过载保护等功能。

如图 6.1-8 所示为三相异步电动机用软起动器起动控制线路。图中虚线框所示为软起动器, 其内部具有电动机过载保护功能。当电路正常时, 内部继电器 KA1 动合触点处于闭合; 若发生过载故障, KA1 动合触头打开。当起动过程完成, 内部继电器 KA2 动合触点闭合。当开关 QS 合闸, KM1 即闭合。按起动按钮 SB2, 电动机按设定的起动程序

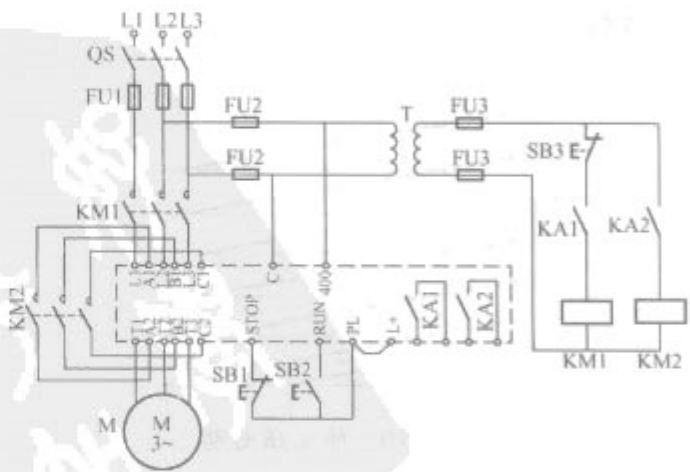


图 6.1-8 三相异步电动机用
软起动器起动控制线路

起动, 当起动完成后, KA2 动合触点闭合, KM2 接触线圈吸合, 电动机转由旁路接触器 KM2 触点直接供电。但此时

过载保护仍起作用, KA1 相当于过载保护继电器的触点。正常停车时, 按停车按钮 SB1, 停止指令使旁路接触器 KM2 断电, 软起动器重新工作, 使电动机在可控状态下减速停车。紧急情况下按 SB3 使接触器 KM1 直接断电, 软起动器内部的 KA2 触点复位、KM2 跳闸, 电动机自由停车。

3.1.4 他励直流电动机的起动

他励直流电动机起动时, 励磁回路不能串有电阻, 而且绝对不允许励磁回路出现断路。他励直流电动机若加额定电压 U_N , 且电枢回路不串电阻, 即直接起动, 此时 $n=0$, $E_a=0$, 起动电流 $I_s=u_N/R_a \gg I_N$, 起动转矩 $T_s=C_T \varphi_N I_s \gg T_N$ 。由于电流太大, 使电动机出现换向不良, 甚至正负电刷间产生电弧, 烧毁电刷架。另外, 起动转矩过大, 还会造成机械撞击, 这些都是不允许的。因此, 除了微型直流电动机, 由于自身电阻大, 可以直接起动外, 一般直流电动机都不允许直接起动。

他励直流电动机起动方法有两种:

(1) 电枢回路串电阻起动。

电枢回路串电阻 R , 起动电流见式(6.1-27)

$$I_s=U_N/(R_a+R) \tag{6.1-27}$$

式中: U_N 为额定电压; I_s 为起动电流; R_a 为电枢电阻。

其机械特性如图 6.1-9 所示。

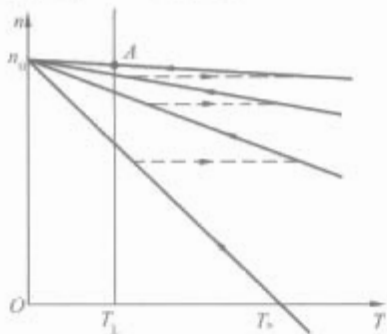


图 6.1-9 电枢回路串电阻起动

若负载转矩 T_L 已知, 根据起动条件, 可以确定串入电阻的大小, 有时为保持起动过程中电磁转矩持续较大及电枢电流持续较小, 可以逐段切除电阻, 待起动完成后, 起动电阻全部切除。

(2) 降电压起动。

降电枢端电压后, 起动电流见式(6.1-28)

$$I_s=U/R_a \tag{6.1-28}$$

式中: U 为电枢端电压。

通常采用可控整流装置调整起动电压, 机械特性如图 6.1-10 所示。

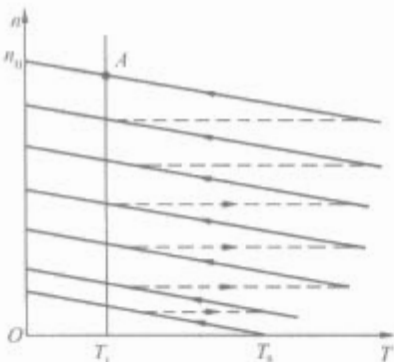


图 6.1-10 降电压起动

3.2 电动机的制动

3.2.1 机械制动

电动机需要迅速而且准确停车时, 尤其是对于某些位能负载(如电梯、卷扬机、升降平台、起重机的吊钩等), 为了防止停车时机械产生滑动, 除了采用电气制动方式外, 还必须采取利用摩擦阻力的机械制动方式, 即通常所说抱闸刹车方式, 故在常用船用起重三相异步电动机和船用直流起重电动机上都配置有圆盘制动器。

须采取利用摩擦阻力的机械制动方式, 即通常所说抱闸刹车方式, 故在常用船用起重三相异步电动机和船用直流起重电动机上都配置有圆盘制动器。

3.2.2 能耗制动

常用船用电动机能耗制动的性能见表 6.1-24。

表 6.1-24 常用船用电动机能耗制动的性能

电动机类型	交流异步电动机	直流电动机
接线方式		
制动特性		
参数	一般取 $I_f=(1\sim3)I_0$ I_f 越大, 制动转矩越大 $R_b=U_f/I_f-z\gamma_{ms}$	制动电阻 $R=E/(I_b-R_a)$ 一般取 $I_b=(1.5\sim2)I_N$
特点	(1) 制动转矩较平滑, 可方便地改变制动转矩 (2) 制动转矩随转速的降低而降低 (3) 可使生产机械可靠地停止 (4) 能量不能回馈电网 (5) 串励直流电动机因其励磁电流随制动电流的减小而减小, 低速时不能得到需要的制动力矩, 不宜采用能耗制动	
适用场所	(1) 适用于经常起动, 频繁逆转并要求迅速准确停车的机械 (2) 并励直流电动机一般采用能耗制动 (3) 大容量笼型异步电动机因反接制动冲击电流太大, 功率因数低, 亦多采用能耗制动 (4) 交流高压绕线转子异步电动机为防止集电环上感应高压, 亦多采用能耗制动	

能耗制动, 是将运转中的电动机与电流断开并改接为发电机状态, 使电能在其绕组中消耗(必要时还可以消耗在外接电阻中)的一种电制动方式。

交流笼型异步电动机和绕线转子异步电动机采用能耗制动时, 应在交流供电电源断开后, 应立即向定子绕组(可取任意两相绕组)通入直流励磁电流 I_f , 以产生制动转矩。制动转矩的大小取决于直流励磁电流 I_f 的大小和电动机的转速。当 $n \approx n_0$ 时, 制动转矩最大; 随着转速 n 的降低, 制动转矩急剧减小。当 $n=(0.1\sim0.2)n_0$ 时, 制动转矩达到最小值。为获得较好的制动特性, 励磁电流 I_f 通常取电动机定子空载电流 I_0 的 $1\sim3$ 倍。绕线转子异步电动机能耗制动时, 应在转子回路中串接 $(0.3\sim0.4)R_{2N}$ 的外接电阻, 这样可以使平均制动转矩等于额定转矩(此时平均制动转矩值为最大)。励磁时, 制动所用直流电源 U_b 可为 48、10 或 220V, 为减小在附加制动电阻 R_b 上的能量损耗, 在供电条件允许情况下, U_b 越小越好。

常用船用交流异步电动机和直流电动机能耗制动的性能见表 6.1-24。

3.2.3 反接制动

反接制动是将三相异步电动机的电源相序反接或将直流电动机的电枢电源反接而产生制动转矩的一种电制动方法。反接制动时，电动机转子电压很高，有较大的反接制动电流。为了限制反接电流，在转子中必须再串接制动电阻 r_{fb} 。

绕线转子异步电动机在反接制动时，转子接频敏电阻比接电阻更好。因其阻抗可随频率的变化而变化，能自动地限制反接制动电流，因而更适应于经常反接的系统，能获得平滑的反向运转。反接制动的接线方式和制动特性见表 6.1-25。

表 6.1-25 反接制动的接线方法和制动特性		
电动机类型	交流异步电动机	直流电动机
接线方法		
制动特性		
制动电阻 (Ω) 的计算	$R_{\Sigma} = (s_{fb}/T_{fb}^*) R_{2N}$ $\text{一般取 } T_{fb}^* = 1.5 \sim 2.0$ $r_{fb} = R_{\Sigma} - \sum r_s - r_N$ $R_{2N} = (u_{2N}/\sqrt{3} I_{2N}) r_N = s_N R_{2N}$	$r_{fb} = (U_N + E_{\max}) / I_{b\max} - (r_a + \sum r_s)$ $\text{一般取 } I_{b\max} = (1.5 \sim 2.5) I_N$
特点	<ul style="list-style-type: none">(1) 在任何转速下制动都有较强的制动效果(2) 制动转矩较大且基本稳定(3) 制动开始时，直流电动机电枢或交流电动机定子上相当于施加两倍额定电压，为防止初始制动电流过大，应串入较大阻值的电阻，能量损耗较大，不经济(4) 绕线转子异步电动机采用频敏变阻器进行反接制动最为理想，因反接开始时，$s_{fb} = 2$，频敏变阻器阻抗增大一倍，可较好地限制制动电流，并得到近似恒定的制动转矩(5) 制动到零时速时应即时切断电源，否则可能会自动逆转	
适用场所	<ul style="list-style-type: none">(1) 适用于需要正、反转的机械(2) 串励直流电动机多用反接制动(3) 笼型异步电动机因转子不能接入外接电阻，为防止制动电流过大而烧毁电动机，只有小功率(10kW 以下)电动机才允许采用反接制动	
符号注释	<p>R_{Σ}——反接制动时，转子回路总电阻</p> <p>r_{fb}——反接制动电阻</p> <p>T_{fb}^*——反接制动转矩的标么值，$T_{fb}^* = T_{fb}/T_N$</p> <p>$I_{b\max}$——允许最大的制动电流</p> <p>s_{fb}——反接制动开始时，电动机的转差率</p> <p>E_{\max}——电动机最大反电动势</p> <p>$\sum r_s$——起动电阻之和</p> <p>r_a——电动机电枢电阻</p> <p>s_N——额定转差率</p>	

3.3 电力电子变流技术

电力电子变流是指利用电力电子器件为核心组成的电力电子电路,以实现在电源和负载之间,改变电压、电流、频率(包括直流)、相位、相数等一个以上的量。用以普通整流管、晶闸管、自关断 IGBT、电力 MOSFET、IGBT 等电力电子器件为核心构成的电流变换器是目前交流调速传动和直流调速传动的主要电流变换装置。

3.3.1 变流器类型

电力电子变流器主要类型见表 6.1-26。

表 6.1-26 电力电子变流器类型和用途

类型	交-直	交-交	直-直	直-交
用途	不可控整流器 可控整流器	间接式交-直-交变频器 直接式交-交变频器 交流电力控制开关	斩波器 脉宽调制器	有源逆变器 无源逆变器

3.3.2 整流器

3.3.2.1 常用整流电路的联结形式和电量关系

常用整流电路的联结形式和电量关系见表 6.1-27,当直流电流 I_d 和理想空载直流电压 U_d 和已知时,可根据该表所列计算关系算出各主电量参数。

表 6.1-27 常用整流电路的联结形式和电量关系

序号	联结形式名称	联结方式	负载性质	臂电流			臂的反向工作电压	输出电压 U_d/U_{d0}	脉波数	功率因数 λ ($\gamma=0$) ^⑤
				平均值	有效值	最大值				
1	单相带中线 (单相全波)		$L_d=\infty$ ^①	$I_d/2$	$0.707 I_d$	I_d	$3.14 U_{d0}$	$\cos\alpha$ ^③	2	$0.900\cos\alpha$
			$L_d=0$	$I_d/2$	$0.785 I_d$	$1.57 I_d$		$\frac{(1+\cos\alpha)}{2}$		
2	单相桥		$L_d=\infty$	$I_d/2$	$0.707 I_d$	I_d	$1.57 U_{d0}$	$\cos\alpha$	2	$0.900\cos\alpha$
			$L_d=0$	$I_d/2$	$0.785 I_d$	$1.57 I_d$		$\frac{(1+\cos\alpha)}{2}$		
3	三相带中线 (三相半波)		$L_d=\infty$	$I_d/3$	$0.577 I_d$	I_d	$2.09 U_{d0}$	$\alpha=0\sim\pi/6; \cos\alpha$	3	$0.826\cos\alpha$
			$L_d=0$	$I_d/3$	$0.58 I_d$	$1.21 I_d$		$\alpha=\pi/6\sim5\pi/6; 0.577[1+\cos(\alpha+\pi/6)]$		
4	三相桥		$L_d=\infty$	$I_d/3$	$0.577 I_d$	I_d	$1.05 U_{d0}$	$\cos\alpha$	6	$0.955\cos\alpha$
5	双星形带平衡电抗器		$L_d=\infty$	$I_d/6$	$0.289 I_d$	$I_d/2$	$2.09 U_{d0}$ $(2.42 U_{d0})$ ^②	$\cos\alpha$	6	$0.955\cos\alpha$
			$L_d=0$	$I_d/6$	$0.293 I_d$	$1.605 I_d$		$\alpha=0\sim\pi/3; \cos\alpha$ $\alpha=\pi/3\sim5\pi/6; 1+\cos(\alpha+\pi/3)$		

续表

序号	联结形式名称	联结方式	负载性质	臂电流			臂的反向工作电压	输出电压 U_d/U_{d0}	脉波数	功率因数 λ ($\gamma=0$) ^③
				平均值	有效值	最大值				
6	双三相桥带平衡电抗器		$L_d=\infty$		$0.289 I_d$	$I_d/2$		$\cos\alpha$	12	$0.985\cos\alpha$
			$L_d=0$	$I_d/6$	$0.293 I_d$	$0.514 I_d$	$1.05 U_{d0}$	$\alpha=0\sim5\pi/12; \cos\alpha$ $\alpha=5\pi/12\sim7\pi/12;$ $1.93[1+\cos(\alpha+5\pi/12)]$		

- ① 当整流器采用平波电抗器时，器件电流接近矩形波，因此在一般计算中，对采用平波电抗器的整流器，取对应于 $L_d=\infty$ 的数值；对不用平波电抗器的整流器，取对应于 $L_d=0$ 的数值。
- ② 括号中数值，对应于平衡电抗器失去扼流作用时(相当于空载或轻载)臂的反向工作峰值电压的计算关系。
- ③ α —触发延迟角； γ —换相重叠角。

3.3.2.2 常用整流电路联结形式的特点和选择

常用整流电路联结形式的特点和选择见表 6.1-28。整流电路联结形式选择的原则应该是：①保证较高的变压器利用率(直流功率 P_d 与变压器的等效容量 S_T 之比要大)，避免

产生磁通直流分量；②电力电子器件的电压、电流容量得到充分利用；③有尽可能多的脉动波数 P ，以减小输出直流电压的脉动分量，限制电网侧谐波电流，保证较高的功率因数，尤其在大容量设备中更应注意。

表 6.1-28 常用整流电路联结形式和选择

联结形式	单相带中线 (单相全波)	单相桥	三相带中线	三相桥	双星形带 平衡电抗器	双三相桥带 平衡电抗器
变压器利用率	差(0.75)	较好(0.9)	差(0.74)	好(0.95)	较差(0.79)	好(0.97)
直流电压脉动情况	较大	较大	一般	较小	较小	小
网侧电流波形畸变 (畸变因数)	一般 (0.9)	一般 (0.9)	严重 (0.827)	较小 (0.955)	较小 (0.955)	小 (0.985)
器件电流容量利用率 (导电时间)	好 (180°)	好 (180°)	较好 (120°)	较好 (120°)	较好 (120°)	较好 (120°)
适用的电压、电流 或容量范围	$U_d\leq 50V$ $P_d\leq 5kW$ 须采用单相 电源时例外	$U_d\leq 230V$ $P_d\leq 10kW$ 须采用单相 电源时例外	$U_d\leq 50V$ $P_d\leq 10kW$	$U_d\geq 250V$ (大容量) $U_d\leq 50V$ (中、小容量)	$U_d\leq 400V$ (大容量) $U_d\leq 100V$ (中等容量)	$U_d\geq 400V$ $P_d\geq 2000kW$ (传动设备) $I_d\geq 12\,500A$ (电解设备)
典型用途和说明	低电压小容量 充电设备	干线牵引、 小容量直流传 动类设备	存在直流磁 通，一般不推 荐使用	电解电源、直流牵 引站电源、中频电源和电 压在上述范围内各种用 途电源设备、 $\geq 10kW$ 传动设备	电解、电镀类和其 他低电压、大电 流设备	大容量电 解、传动类 和船用设备

3.3.3 斩波器

直流斩波器是一种把恒定直流电压变换为负载所需的可调直流电压的变换装置。它通过周期地快速通断而把恒定的电流电压斩成一系列的脉冲电压，通过控制这一系列脉冲的占空比 α 来实现输出电压平均值的调节。它可以调阻、调磁和调压，也能使电动机实现再生制动，把电能反馈给电源。

控制占空比 α 有三种方式：①保持斩波周期 T 不变，只改变其导通时间 t_{on} ，称脉冲宽度调制，简称 PWM；②保持导通时间 t_{on} 不变，而改变斩波周期 T ，称脉冲频率调制，简称 PFM；③既改变 T 又改变 t_{on} ，称为脉冲时间调制，简称 PTM。表 6.1-29 列出基本斩波电路。

图 6.1-11 所示为电流可逆斩波电路的原理图及其典型的工作波形。V1 和 VD1 构成降压斩波电路，由电源向电动机供电为电动运行状态。V2 和 VD2 构成升压斩波电路，把电动机的动能回馈到电源，为再生运行。该电路可工作于第一、二象限。

图 6.1-12 所示为桥式可逆斩波电路，该电路可以看作是两组电流可逆斩波电路的组合，当 V4 保持导通时可工作

于第一、第二象限。当 V2 保持导通时，该电路可工作于第三、四象限。直流随动系统中广泛采用图 6.1-12 所示斩波电路。

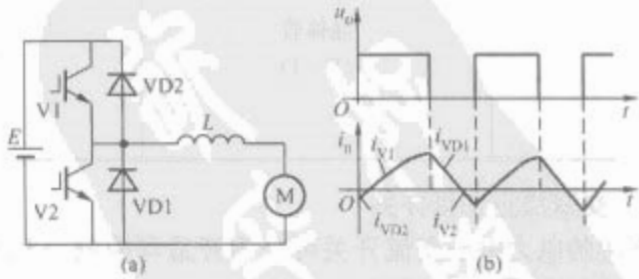


图 6.1-11 电流可逆斩波电路及工作波形

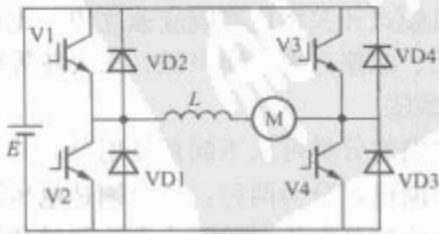


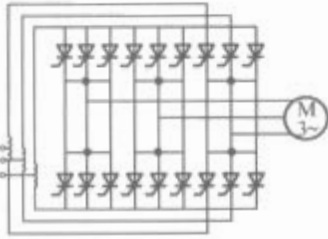
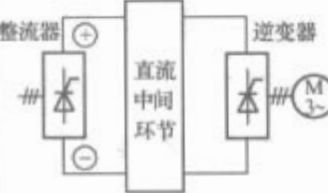
图 6.1-12 桥式可逆斩波电路

有电感。

3.3.6 变频器

典型的变频器电路及性能见表 6.1-31。

表 6.1-31 典型的变频器电路及性能

名称	典型接线图	性能特点
交-交变频器①		(1) 换能过程为一次(交-交)、效率较高、变频器的电源可以是单相或三相 (2) 变频器所用元件较多、线路复杂、图示为三相半波反并联电路,需元件 18 个,若为三相桥式,则需 36 个 (3) 如不采用强迫换流,输出最高频率仅为电网频率的 1/3~1/2,且电网功率因数低 (4) 容易实现再生制动,适用于四象限运行状态 (5) 适用于低速大功率场合
交-直-交变频器②		(1) 换能过程为二次(交-直、直-交)、效率较低 (2) 变频器所用元件较少 (3) 输出频率范围宽 (4) 变频器组成特点:由整流器与逆变器两大部分组成,各部分通常均采用三相桥式电路,当直流中间环节并联大电容时,为电压源型;串入大电感时,为电流源型 (5) 交-直-交变频器被广泛地应用在交流调速上 电流源型 1) 主回路简单、可靠、易于实现过电流、短路保护及再生制动,可四象限运行 2) 不允许无载运行,需要最小负载电流来满足逆变器的换流;适用于大、中功率的单机拖动 电压源型 1) 换流电路比较复杂 2) 不能再生制动,需要制动时应附加电路 3) 采用 PWM 控制,在较宽频率范围内,都有良好的输出;适用于中、小功率拖动系统或多机拖动

① 交-交变频器实质上是两组反并联的可控整流器所组成,与直流可逆系统不同之处,在于相控角 α 的调制规律不同。因此直流可逆系统中所用的有环流和无环流系统的概念,同样适用于交-交变频器。
② 交-直-交变频器中的逆变器,如采用晶闸管逆变电路,换流问题将是电路安全可靠运行的关键,在确定电路方案时,应重视各种换流电路的比较,如果采用 GTO(可关断晶闸管),GTR(大功率晶体管)等自关断器件,则电路可大为简化。

3.4 交流调速

近 20 年来,随着电力电子技术、微电子技术、计算机技术以及自动控制技术的发展,交流调速技术日趋完善。性能和成本已能和直流调速相竞争,许多领域用交流调速取代直流调速已成为趋势。目前不仅凡是能用直流调速的场合,都能改用交流调速,一些采用直流调速难以满足要求的,如大容量、高转速、高电压及环境十分恶劣的场所,都能采用交流调速满足要求。而且原来不调速的风机、泵类负载采用交流调速后,可以大幅度节能。

3.4.1 交流调速的分类

交流异步电动机的转速计算公式见式(6.1-29),交流同步电动机的转速计算公式见式(6.1-30)

$$n = 60f(1-s)/p \tag{6.1-29}$$

$$n = 60f/p \tag{6.1-30}$$

式中: n 为电动机转速; f 为定子供电频率; p 为电动机极对数; s 为电动机转差率。

由式(6.1-29)和式(6.1-30)可见改变交流电动机转速的途径无非是变 f 、变 p 和变 s 。常见的电动机调速系统分类见表 6.1-32。

表 6.1-32 电动机调速系统分类

调速分类		装置所在位置	方 法	效率	适用电动机
有级调速	变极对数 转子串电阻	定子侧 转子侧	变 p 变 s	高效 低效	笼型异步电动机, 绕线转子异步电动机
	定子调压	定子侧	变 s	低效	笼型异步电动机, 绕线转子异步电动机
无级调速	定子变频	定子侧	变 f	高效	笼型异步电动机, 绕线转子异步电动机,同步电动机
	串级调速	转子侧	变 s (向下调)	高效	绕线转子异步电动机
	双馈调速	转子侧	变 s (上、下调)	高效	绕线转子异步电动机
	电磁转差离合器	转 子 轴上	调 s	低效	笼型异步电动机, 绕组转子异步电动机,同步电动机
	液力耦合器	转 子 轴上	调 s	低效	笼型异步电动机, 绕线转子异步电动机,同步电动机

3.4.2 交流电动机的有级调速

(1) 笼型异步电动机的有级调速。笼型异步电动机可以有单速、双速、三速、四速几种结构形式。只要通过改变定子绕组的接线方式就可以改变定子绕组的极对数 p ,从而也就改变了同步转速,实现了电动机的变极调速。

(2) 绕线转子异步电动机的有级调速。绕线转子异步电动机的转子极对数不能自动随定子极对数改变而改变。如果要同时改变定子、转子绕组的极对数又太复杂,因此不采用变极对数调速方式。对于绕线转子异步电动机,只要改变串入转子回路电阻值的大小,就可以改变其机械特性。因此可以

在转子绕组中对称地串入一组、二组、三组附加电阻,再根据工况的需要选接不同的电阻组,从而就可以实现电动机的有级调速。这种调速方式因其空载转速 n_0 不变,故调速范围不大,一般为(2~3):1,负载小时,调速范围就更小。这种调速方式多用于断续工况的生产机械上。这类机械在低速运行的时间不长,而且对调速的性能要求不高。

3.4.3 交流电动机的无级调速

3.4.3.1 定子调压调速系统

定子调压调速系统是一种通过改变电动机定子电压(频率不变)实现电动机转速调节的调速系统:适用的电动机是笼型异步电动机和绕线转子异步电动机,调压装置是晶闸管交流调压器。对应不同的定子电压可以得到一组不同的机械特性,如图6.1-14所示。对于某一固定负载转矩电动机将稳定工作于a、b和c等转速,从而实现调压调速。

普通笼型异步电动机机械特性工作段S很小,对恒转矩负载而言,调速范围很小,但对于风机和泵类负载机械,由于负载转矩 $T_L = kn^2$,即与转速二次方成正比例,故可以得到较宽的调速范围,如图6.1-15所示。若要扩大恒转矩负载的调速范围,可用高阻转子电动机或转子外接电阻(或频敏变阻器)的绕线转子异步电动机。高阻转子电动机(如力矩电动机)的调压调速特性见图6.1-16。低速工作时,特性很软工作不易稳定,负载和电压稍有波动,会引起转速很大波动,为提高调速硬度,宜采用转速闭环控制系统。

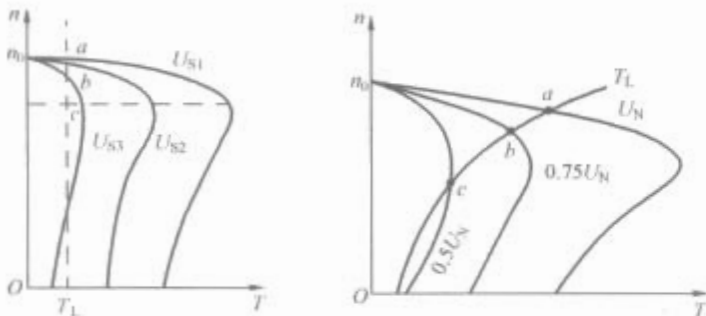


图 6.1-14 不同 U_s 的机械特性

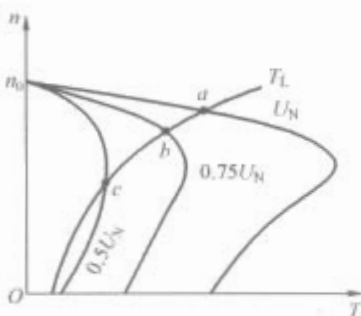


图 6.1-15 风机、泵类负载调压调速特性

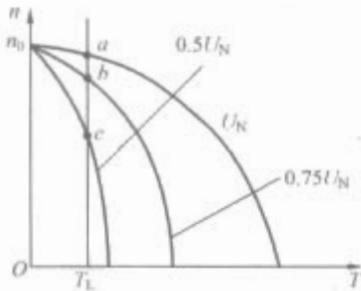


图 6.1-16 高阻转子电动机调压调速特性

调压调速的主要优点是简单、便宜、使用维修方便。主要缺点是转差功率损耗大、效率低、谐波大。调压调速主要用于软起动。在一些容量不大、调速范围不宽、精度要求不高(一般为3%),连续工作时间不长的设备中也可以采用调压调速,例如起重机械、风机和泵类机械等。

3.4.3.2 变频调速

变频调速是利用电动机的同步转速随供电频率的变化而变化的特性进行调速的方法。用静止变频装置构成变频电源对电动机进行调速已被广泛采用。变频装置种类很多,归纳起来可分为交-直-交间接变频器和交-交直接变频器两类。在交-直-交间接变频器中,先用交-直变流装置-整流器,把交流电变为直流电,再用直-交变流装置-逆变器,把直流电

变为另一种频率的交流电(两次变换)。根据直流回路中储能元件的不同,交-直-交间接变频器又分为电压型、电流型和脉宽调制型(PWM)三种类型。脉宽调制型也可以认为是电压型。脉宽调制是将一个周期的逆变电压分割成几个脉冲、分割脉冲时使电流谐波成分尽量减少。这种方式具有电源侧功率因数高、电动机侧谐波成分少、调速范围宽(20:1)和响应快的特点。电压型和电流型变频器的主要性能比较见表6.1-33。

表 6.1-33 电流型与电压型变频器主要性能比较

变频器类别	电 流 型	电 压 型
比较项目		
储能元件	电抗器	电容器
输出电压波形①	决定于负载,当负载为异步电动机时,近似正弦波	矩形
输出电流波形①	矩形	决定于逆变器与电动机的电动势,有较大的谐波分量
输出动态阻抗	大	小
再生制动	方便,不需附加设备	需要附加电源侧反并联逆变器
过电流及短路保护	容易	困难
动态特性	快	较慢,用 PWM 则快
对开关器件要求	耐压高,对关断时间无严格要求	一般耐压可较低,关断时间要求短
线路结构	较简单	较复杂
适用范围	单机、多机	多机、变频或稳频电源

① 指三相桥式逆变器,既不采用脉冲宽度调制,也不进行多重叠加。

交-交变频与交-直-交变频主要性能比较见表6.1-34。

表 6.1-34 交-交变频与交-直-交变频主要性能比较

变频器类别	交-交变频	交-直-交变频
比较项目		
换能形式	一次换能、效率较高	两次换能、效率略低
换流方式	电源电压换流	强迫换流或负载换流
装置元件数量	元件较多、元件利用率较低	元件较少、元件利用率较高
调频范围	最高频率为电源频率的1/3~1/2	频率调节范围宽,不受电源频率限制
电网功率因数	较低	移相调压、低频低压时功率因数低,用斩波或PWM调压则功率因数高

工程上交流电动机定子侧变频调速是应用最广的调速系统,它的种类很多,应用最多的控制系统有:标量V/F控制(压频比控制)、矢量控制和直接转矩控制。

标量V/F控制系统是开环电压控制系统。它是这样一种控制方式,即改变频率的同时也控制变频器的电压,使电动机的磁通保持一定,在较广范围内调速运转时,电动机的

功率因数效率不下降。由于开环电压控制的同步电动机存在失步可能,所以V/F控制多用于异步电动机,仅在个别加减速缓慢和负载平稳的小功率场合可用于同步电动机。标量V/F控制在电动机额定频率以下为恒转矩调速,在电动机额定频率以上为恒功率调速。

矢量控制是这种一种控制方法,交流电动机的所有矢量(磁通势、磁链、电压、电流等)都在空间以同步速度旋转,它们在定子坐标系(静止系)上的各分量,即在定子绕组上的物理量,都是交流量,控制和计算不方便。借助坐标变换,使人从静止坐标系进入同步坐标系,电动机各矢量都变成静止矢量,它们在各坐标系上分量都是直流量,可以很方便地从转矩公式出发找到转矩和被控矢量(电压或电流矢量)各分量之间的关系,实时算出转矩控制所需的被控矢量各分量值(直流给定值)。由于这些被控矢量的直流分量在物理上并不存在,因此还必须再经坐标变换,从旋转坐标系再回到静止系,把上述直流给定量变为物理上存在的交流给定量,在定子坐标系对交流量进行控制,使其实际值等于给定值。这种控制方法就是矢量控制。适用于永磁同步电动机、励磁同步电动机和异步电动机的变频调速。

直接转矩控制系统中没有矢量变换,是利用高速计算器件,直接从定子交流电压、电流瞬时值,计算磁链矢量的幅值和位置角的瞬时值及转矩瞬时值,通过两个滞环控制器控制转矩。该控制方法计算公式简单,但对计算速度要求高,目前还仅适用于异步电动机的变频调速。

矢量控制和直接转矩控制系统均适用于高性能交流调速系统。调速范围1:100以上,速度响应性极高,适合于急加、减速运转和连续四象限运转。

3.4.3.3 定子侧低电压型交-直-交变频调速应用中应注意的问题

定子侧低压(<1000V)交-直-交变频调速系统是一种应用最广泛的交流调速系统。由于缺少能承受较高反向电压的电力电子器件及中间直流回路中的电抗器大、低效等原因,低压电流型交-直-交变频器很少应用,现在几乎所有低压交-直-交变频器都是电压型的。变频器通常都由专业生产厂生产,变频器自身的一系列技术问题都应由生产厂综合处理。除此之外作为船舶电气工程设计人员还应注意以下问题:

1) 从改善电磁兼容性和设备的自身安全考虑,应在变频器输入端加装交流电抗器(压降2%~4%)或隔离屏蔽变压器。

2) 在变频器输出端加装输出滤波器。输出滤波器有三种,输出电抗器、限制 du/dt 的滤波器和正弦滤波器。

3) 抑制轴电流问题,逆变器工作时,电动机绕组对地间存在共模电压,这种共模电压会通过寄生电容在电动机轴上感应出轴电压,通过轴承和电动机外壳流过轴电流,损害轴承。采用逆变器输出滤波,减小 du/dt ,有助于减小轴电压、轴电流。对于机座号大于280的中型电动机,通过加装轴接地电刷和在电机轴的非传动端加装绝缘轴承,可以消除轴电流危害。

4) 普通电动机采用变频调速后需适当降容,降容的原因有三条:逆变器输出的谐波给电动机带来附加损耗,约增加10%;普通电动机多为自通风电动机,当转速下降则通风量下降,冷却效果下降,电动机输出转矩需相应降低(对于外通风电动机,转矩不降);在额定转速以上是弱磁调速区,电动机的转矩约按 f_n/f 比例降低,功率近似不变,但异步电动机的颠覆转矩按 $(f_n/f)^2$ 减小,故在弱磁范围较宽的应用场合,需校验颠覆转矩(留30%裕量)。普通电动机

用于变频调速后的降容曲线见图6.1-17。

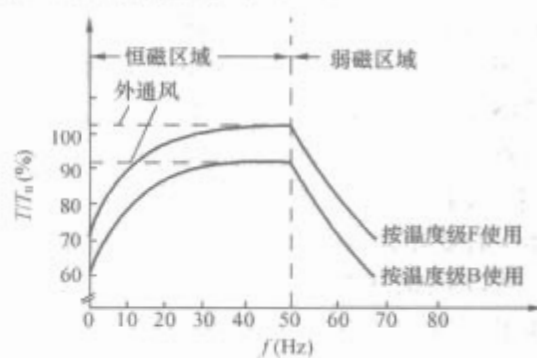


图 6.1-17 普通电动机用于变频调速后的降容曲线

5) 逆变器输出电缆问题,由于逆变器输出电缆传输的电压、电流中含有大量谐波,电缆对地存在脉动的共模电压,会对周围其他电子设备工作带来干扰,因此要求电缆最好采用屏蔽电缆,如若使用普通电缆,最好将这些电缆置于单独的,屏蔽良好的走线槽中,不要和其他电子设备电源及控制线混在一起。

6) 直流储能电容的预充电问题,变频器长时间放置后(半年以上),在使用前必须对直流储能电容预充电。充电电压及充电时间与变频器规格和放置时间有关,请参阅具体设备的使用手册。

3.4.3.4 永磁同步电动机调速系统

永磁同步电动机是近年来发展较快的新型电动机。电动机的转子上没有绕组,而是镶有永久磁铁,其气隙磁场呈正弦分布,转子轴上装有位置传感器,位置传感器有两类:光电编码器和旋转变压器。电动机的调速系统是按转子位置控制定子绕组电流,属同步电动机自控变频调速,无失步问题。

变频器的PWM实现用电流跟踪控制法时(参见有关资料),永磁同步电动机的转矩控制框见图6.1-18。

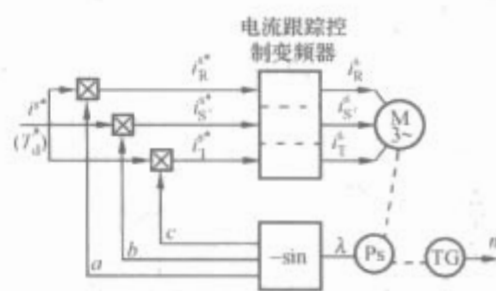


图 6.1-18 永磁同步电动机的转矩控制框图 (电流跟踪控制)

永磁同步电动机的特点是:

- 1) 转子无绕组、结构简单、坚固、转子不发热、仅定子发热,散热容易。
- 2) 比异步电动机的效率高,体积小,质量轻。
- 3) 转矩控制比异步电动机的简单。
- 4) 转矩脉动小,调速性能好。
- 5) 怕转子发热使永久磁铁失磁;弱磁调速困难。

目前无位置传感器的永磁同步电动机调速系统也已用于产品,它的位置信号是通过用定子电压、电流计算定子电动势得到,但在电动机起动之初,电动势太小,计算不准,只能他控变频起动(频率人为设定,从零慢慢升起),待转速大于设定值(例如5%)后再转入自控变频。

基于永磁同步电动机的特点,永磁同步电动机得到广泛应用,国产永磁同步电动机功率达几百千瓦,国外用于船舶推进的永磁同步电动机功率已达几兆瓦。

3.4.3.5 转子侧串级调速系统和双馈调速系统

转子侧串级调速和双馈调速系统都是转子侧高效调速系统,只适用于绕线转子异步电动机。电动机定子绕组接电网,转子绕组经调速装置 VF 接电网,见图 6.1-19。通过在转子回路中引入可控的附加电动势 E_r 来改变转差率 s ,实现调速。调速装置一端接转子绕组,它的频率和电压随转差率 s 的变化而变化,它的另一端接电网,频率和电压固定,所以该调速装置 VF 实质上是一台变频器(从可变频率和电压变为固定频率和电压)。这类调速亦可看作为转子侧变频调速。图中 E_m 是转子不转($s=1$)时的转子电动势。

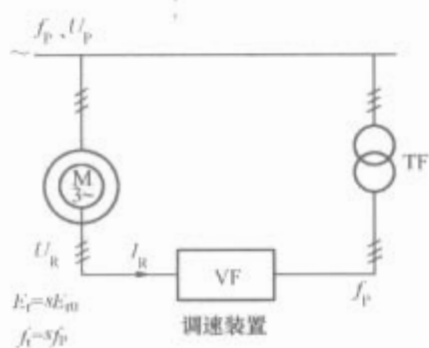


图 6.1-19 转子侧串级和双反馈调速系统示意图

这类调速系统有四种工作状态:次同步(低于同步速, $s > 0$)电动(转矩 > 0)状态;次同步再生(转矩 $T_d < 0$)状态;超同步(高于同步速, $s < 0$)电动状态;超同步再生状态。这四种工作状态的功率流见图 6.1-20。

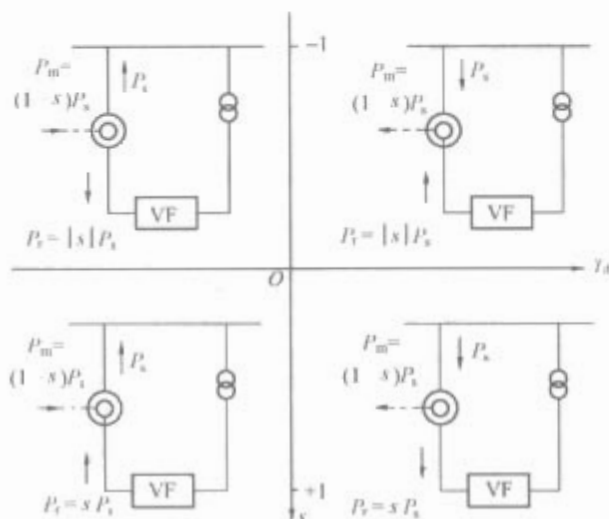


图 6.1-20 四种工作状态的功率流图

在电动状态,定子功率 P_s 从电网流向定子,电动机输出的机械功率 $P_m = (1-s)P_s$,若 $s > 0$ (次同步), $P_m < P_s$,它们之差为转子功率 $P_r = sP_s$,经 VF 返回电网;若 $s < 0$ (超同步) $P_m > P_s$,它们之差为转子功率 $P_r = sP_s$,从电网经 VF 输入转子。在再生状态,定子功率 P_s 从定子流向电网,电动机输入的机械功率为 $P_m = (1-s)P_s$,若 $s > 0$ (次同步), $P_m < P_s$,它们之差转子功率 $P_r = sP_s$ 从电网经 VF 输入转子;若 $s < 0$ (超同步), $P_m > P_s$,它们之差为转子功率 $P_r = sP_s$,经 VF 送给电网。如果只工作在次同步电动或超同步再生状态, P_r 都从转子流向电网,若 VF 采用交-直-交变频,则与转子绕组相连的整流器可使用不可控整流器(单象限变频);如果要工作在另两种状态, VF 必须是四象限变频器。

只工作于次同步电动状态的调速系统通常称为串级调速系统(亦称静止型 Scherbius 系统),使用单相限 VF;能

工作于其他状态的系统通称为双馈调速系统,使用四象限 VF。

串级调速系统和双馈调速系统的特点:

1) 虽然是改变转差率 s 调速,但转差功率被送回至电网或由电网供给,没有消耗在电阻上,属高效调速。

2) 转子侧调速多用于中压绕线转子异步电动机,它的转子电压都是低压, VF 也就为低压变频器,避免了定子侧中压变频带来的许多麻烦。

3) 转子侧串级调速和双馈调速多用于调速范围小的场合,通常转差率 $s < 0.4$,转子功率 $P_r = sP_s$ 小,所以 VF 容量比电动机额定功率小很多。基于上述特点转子侧串级调速和双馈调速系统在风机和泵类等场合得到广泛应用。

3.4.3.6 电磁转差离合器调速

电磁转差离合器调速是由笼型电动机或柴油发动机恒速拖动一个具有直流励磁绕组的可变速电磁离合器来实现的。电磁离合器(也称滑差电动机)由电枢和磁极两部分组成,两者无机械联系,都可自转动。电枢是一金属碗,无绕组,由电动机或柴油发动机带动恒速旋转称为主动部分;磁极用联轴器与负载相连称为从动部分。磁极沿离合器气隙周围产生若干对 N、S 极性交替的磁场,电枢与磁极的相对运动切割磁力线而产生涡流,这涡流与磁通的相互作用,使另一个旋转部分产生转矩而跟随转动起来。改变励磁电流就能改变转矩,改变励磁电流的大小便可实现对负载的调速,其输出转速不可能超过主动轴的转速。这种调速是一种损耗型调速,低速时由于电枢涡流发热损耗能量,所以效率较低。因此适合于短时深调速而长期高运转的机械。但由于它具有制造方便、结构简单、成本低廉、维修方便、起动平滑、起动转矩大、调速范围广而获得广泛应用。由于其结构和机械特性的特殊性,尤其是起动转矩大,不怕堵转,特适用于如挖泥船之类的特种机械传动。电磁转差离合器调速系统的机械特性见图 6.1-21。

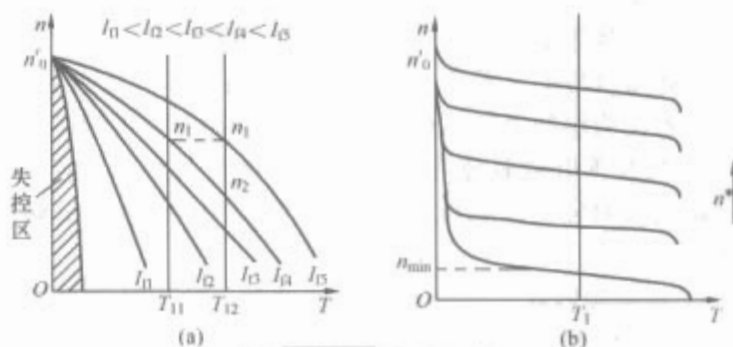


图 6.1-21 电磁转差离合器调速系统的机械特性
(a)开环特性;(b)闭环特性

电磁转差离合器常和驱动电动机做成一体,称为电磁调速电动机。我国的 JZT 系列电磁调速电动机的容量范围为 0.6~90kW, JZTX 系列为 5.5~160kW。

3.5 直流调速

直流调速传动由于其调速范围宽,调速平滑精确、效率高、容易控制、响应快速等优点,即使在当今交流调速传动得到很大发展的情况下,仍被广泛应用。

直流电动机转速计算公式见式(6.1-31)

$$n = [U - I(R + R_f)] / C_e \Phi = n_0 - I(R + R_f) / C_e \Phi \quad (6.1-31)$$

式中: n_0 为电动机空载转速, $n_0 = u / C_e \Phi$; u 为加在电枢回路上的电压; Φ 为电动机磁通; R 为电动机电枢电阻; R_f 为电枢回路串联的附加电阻; C_e 为电动势常数。

因此, 直流电动机有三种基本调速方式, 即改变电源电压、改变电枢电路附加电阻 R_f 和调节电动机磁通 Φ 。改变电枢电路附加电阻的方式由于电阻损耗功率大, 调速范围小, 特性硬度软而极少在调速系统中得到应用。调节电动机磁通的方式单独使用的也较小, 一般结合调压调速方式在某些恒功率负载特性的机械上有所应用。因此, 改变电源电压的方式是直流电动机调速传动的主要方式, 并且一般都采用他激电动机。

直流调速系统原理及机械特性曲线见表 6.1-35。

直流调压调速传动中的电流变换装置可以是各种型式的直流发电机及功率型放大控制器件。过去较多采用电机放大机及磁放大器。随着电力电子器件的发展, 晶闸管及新型大功率半导体器件, 如功率 MOSFET、IGBT、IGCT 等已成为电流和功率级变换装置的主流。但从船舶应用而言, 由于电力电子器件产生的波形畸变对船舶有限电网及对电子设备电磁兼容性的影响应特别重视。一般认为电力电子器件容量以不大于电网容量的 30% 为宜。各种调速方式的性能比较见表 6.1-36。

3.6 电气保护

3.6.1 电动机的保护

(1) 除如舵机电动机之类特殊情况之外, 额定功率超过 0.5kW 的电动机及其他重要用途的电动机均应设有独立的过载和短路保护。

若电动机由专用电缆供电且该供电电缆电源侧的保护装置能同时为电动机提供短路保护, 则可以不再为电动机另专门配置短路保护。

(2) 对于连续工作制的电动机, 其过载保护装置的最大持续电流应整定(或选取)为电动机额定电流的 105%~125%。

对于短时或断续工作制的电动机, 其过载保护装置的最大持续电流应根据电动机的实际选用情况及工作情况进行整定(或选取)。

(3) 当过载保护装置的时间-电流特性无法与电动机的起动特性相适应时, 允许采用自动控制措施使得该保护装置在电动机起动过程中暂时不起作用, 但在电动机转入稳定运行后, 应立即恢复其正常的保护功能。

(4) 如果三相电动机的供电电路中接有熔断器则应设有防止该电动机单相运转的保护。

(5) 除舵机电动机外, 交流电动机均应设有欠电压保护。当供电电压在正常频率下下降到额定电压的 20% 左右时, 保护装置应能瞬时或延时(根据需要而定)分断电路。当供电电压超过额定电压的 85% 时, 保护装置应允许电动机起动。

(6) 应根据电动机对供电连续性的不同要求, 选择合适的失电之后又恢复供电的保护。通常可按电动机对供电连续性要求的递减顺序, 依次选用下列几种保护方式:

1) 电压恢复后立即自行起动。

2) 电压恢复后延时自行起动。(延时可由短到长分若干档次)。

3) 电压恢复后不再自行起动。

电压恢复后的自行起动一般应按正常的

起动程序进行。同时应防止由于成组电动机的起动而产生过大的冲击电流和导致过大或持续时间过长的电网电压跌落。

电压恢复后不再自行起动的电动机应设有零位保护。

(7) 对电动或电动液压舵装置中的电动机及其控制设备应只设短路保护, 而不允许设置过载和欠电压保护。

若采用塑壳式自动空气断路器的瞬时脱扣特性来承担上述短路保护, 则其始动电流值对直流应取为 300%~400% 的电动机额定电流, 对交流应取为等于或稍大于电动机起动电流的 125%。

若用熔断器来承担上述短路保护, 则熔体的额定电流应比电动机的起动电流高一档, 若通过短路计算确认实际短路电流小于电动机的起动电流时, 应酌情降低熔体的额定电流值。

(8) 对于额定功率大于 5.5kW(交流 380V) 的异步电动机不宜采用断路器作为其配电电路的末级保护。

(9) 若电动机通过自动转换开关由多路馈电线供电, 则设置在这些馈电线路上的保护装置应能承受由于自动转换开关的延时转换所形成的过电流而不发生误动作。

(10) 相序保护, 对直接用三相交流电(不经变频或整流处理)驱动的客、货电梯, 提升机之类应有相序保护措施。

(11) 直流电动机的失磁保护, 当直流他励, 并励电动机的励磁电流迅速消失(或尚未达到规定值)时, 机组应自动停机(或无法起动)。

(12) 船用客货电梯之类设备应设超速保护装置。

3.6.2 变压器保护

(1) 变压器电路应设有短路保护和过载保护。短路保护应设在变压器一次侧, 过载保护可以设在变压器的二次侧; 当变压器的容量对其供电的电路不可能处于过载状态时, 则变压器可以不设过载保护。短路保护装置的瞬时整定值应考虑变压器励磁冲击电流的影响。

(2) 并联运行变压器的二次电路应设有隔离设施。

(3) 变压器一次电路保护装置与二次负载电路保护装置的设置应尽可能做到有选择地配合。

3.6.3 电力电子变流装置的保护

在电力电子变流回路中, 整流变压器的接通和断开、电感性负载的断开、电力电子变流器件的换向、快速熔断器的熔断, 甚至雷击等, 都会在变流器回路中产生过电压。在无抑制回路条件下, 其瞬变电压峰值可达正常值的 8~10 倍。图 6.1-22 是电力电子变流回路电气保护措施及配置位置图。

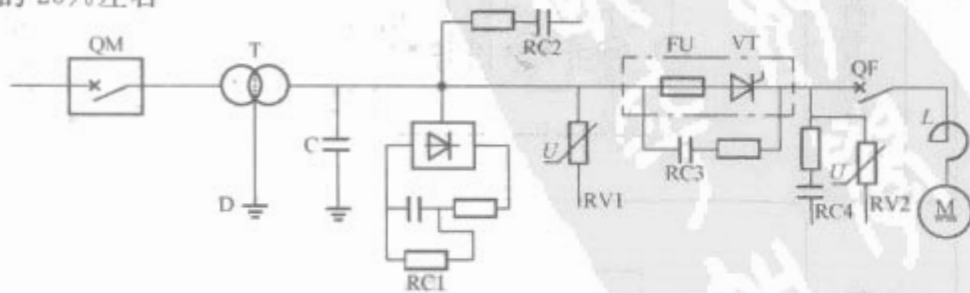


图 6.1-22 电力电子变流回路电气保护措施及配置

QM—交流侧断路器; T—变压器; D—变压器静电屏蔽; C—静电感应抑制电容; RC1—交流整流式抑制回路; RC2—交流阻容抑制回路; RC3—换相过电压抑制回路; RC4—直流阻容抑制回路; RV1、RV2—交流侧压敏电阻抑制回路; FU—快速熔断器; VT—电力电子变流器件; QF—直流快速断路器

表 6.1-35 直流调速系统原理及机械特性曲线

分 类	电机放大机-发电机-电动机系统				机械特性曲线	调节方式		
	简单发电机-电动机系统	电压截止系统	电流截止系统	转速截止系统				
系统原理简图								
调节发电机电流	(1) 调节比较电压 (2) 调节给定励磁 (3) 调节电流反馈	(1) 调节比较电压 (2) 调节给定励磁 (3) 调节电压反馈	(1) 调节比较电压 (2) 调节给定励磁 (3) 调节电压反馈	(1) 调节转速比较电压 (2) 调节给定励磁 (3) 调节电流比较电压	(1) 调节并励磁场 (2) 调节他励磁场	可采用各种反馈装置,以得到和电机放大机系统相类似的各种机械特性曲线和相应的调节方法		

续表

分 类	简单发电机-电动机系统	电机放大机-发电机-电动机系统				三绕组发电机-电动机系统	磁放大器-发电机-电动机系统	晶闸管-电动机系统	晶闸管-发电机-电动机系统	
		电压截止系统	电流截止系统	转速截止系统						
用途说明	用于调速范围广或平滑微调,经常长期低速运行等场合	用于调速范围广有堵转可能的场合。硬度稍差,增加比较电压电阻功率可改善。易得到下垂性很强的特性(挖土机特性)	用于调速范围广有堵转可能,经常正反转的场合。硬度比简单发电机-电动机系统好。在与电压截止系统相同的下垂性要求下,主电路往往要增加信号电压,加中间放大则系统复杂,加电阻则损耗巨大	用于硬度要求特别大,调速范围极广的场合	用于调速范围广有堵转可能,硬度要求不高的场合	参见相关资料选用				
备 注		比较电压电阻功率较小	比较电压电阻功率较大	可采用交流调速发电机加整流环节,则低速稳定性更好	将 BQ ₂ 去掉,即为差复激发电机-电动机系统,机械特性曲线相似	为降低时间常数,常采用二级或三级串联放大线路	上图为反并联连接全控线路,可满足快速启动、制动、反转和频繁可逆场合。对于大功率不频繁可逆的场合可用一套装置进行主电路有触点可逆转换		晶闸管装置需考虑强迫励磁倍数。对于不频繁可逆的场合可用一套装置进行励磁实施有触点可逆转换	

表 6.1-36 调速方式的性能比较

调速方式和方法		控 制 装 置	调速范围	速度变化率	平滑性	动态性能	恒转矩或恒功率	效 率
改变电枢电阻	串电枢电阻	变阻器或接触器电阻器	2:1	低速时大	用变阻器较好,用接触器和电阻器较差	无自动调节能力	恒转矩	低
改变电枢电压	电动机-发电机组	发电机组或电动机扩大机(磁放大器)	1:10~1:20	小	好	较好	恒转矩	60%~70%
	静止变流器	晶闸管变流器	1:50~1:100	小	好	好	恒转矩	80%~90%
	斩波器(脉宽调制)	IGBT 或晶闸管开关装置	1:50~1:100	小	好	好	恒转矩	80%~90%
改变磁通	串联电阻或用可变直流电源	直流电源变阻器,磁放大器	1:3~1:5	较大	较好	差	恒功率	80%~90%
		晶闸管变流器			好	好		

3.6.3.1 隔离变压器及其静电感应过电压保护

图中静电感应接地抑制电容 C, 是为了抑制由于变压器寄生电容的存在而在变压器通电瞬间产生的合闸过电压而设。通常取 $C=0.02\sim0.04\mu\text{F}$ 之间, 电容器的工作电压 $U_c>$ 变压器二次绕组电压 $U_{2\phi}$ 。使用时必须注意若为三相变压器则三相电容的中性点必须可靠接地。

3.6.3.2 交直流电阻电容过压保护

采用过电压抑制电路是工程设计中最常用的保护措施。其典型联结方式见图 6.1-23。过电压抑制电路可接于变压器的网侧、阀侧或装置的直流侧, 参数的计算见表 6.1-37~表 6.1-40。对大容量的变流装置, 可采用反向阻断式 RC 电路, 以减小装置的体积和发热量, 其联结方式和参数计算见表 6.1-41。

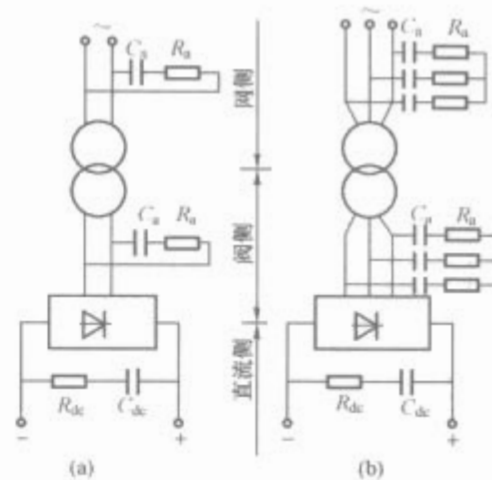


图 6.1-23 浪涌过电压抑制用 RC 电路联结方式
(a)单相; (b)三相

表 6.1-37 小容量变流器交流侧浪涌过电压抑制用 RC 电路计算公式^①

变压器容量	电容 $C_a(\mu\text{F})$	电阻 $R_a(\Omega)$	符号说明
单相, $\leq 200\text{VA}$	$C_a=700S_T/U_{\text{ARM}}$	$R_a=100\sqrt{U_d/I_d C_a \sqrt{f}}$	S_T ——变压器等效容量, VA K_{RS} ——系数, 见表 6.1-49 f ——电源频率, Hz U_{ARM} ——臂反向工作峰值电压, V U_d ——额定直流输出电压, V I_d ——额定直流输出电流, A
单相, $\geq 200\text{VA}$	$C_a=400S_T/U_{\text{ARM}}$		
三相, $\leq 5\text{kVA}$	$C_a=K_{\text{RS}}S_T/U_{\text{ARM}}^2$		

① 本表计算公式以 RC 电路接于阀侧绕组为依据, 当接于网侧时 kU_{ARM} 作为 U_{ARM} 代入等式, 其中 k 等于网侧电压 U_L 与阀侧电压 U_{v0} 之比。

表 6.1-38 计算系数 K_{RS}

变压器联结型式	K_{RS} 的数值	
	RC 作三角形联结	RC 作星形联结
Yy 双拍(网侧中点不接地)	150	450
Yd 双拍(网侧中点不接地)	300	900
其他双拍联结形式及所有单拍联结形式	900	2700

表 6.1-39 直流侧 RC 抑制电路计算公式

联结形式	电容 $C_a(\mu\text{F})$	电阻 $R_a(\Omega)$	电阻功率 $P_{R_a}(\text{W})$	符号说明
单相桥	$120\,000 \frac{\xi I_V}{f U_{V0}}$	$0.254 \frac{U_{V0}}{\xi I_V}$	$\frac{U_a^2 R_{dc}}{\left(\frac{1}{2\pi f_n C_{dc} \times 10^{-6}}\right)^2 + R_{dc}^2}$	U_a ——纹波电压, 一般 U_d 取幅值最高、序次最低的谐波电压 U_n , V f_n ——与 U_n 相对应的谐波频率(Hz) ξ 、 U_{V0} 、 I_V 、 f ——见表 6.1-40
三相桥, 三相带中线、双星形带平衡电抗器	$121\,244 \frac{\xi I_V}{f U_{V0}}$	$0.058 \frac{U_{V0}}{\xi I_V}$		

表 6.1-40 大容量变流器交流侧浪涌过电压抑制用 RC 电路计算公式

电联结 型式	接于变压器阀侧			接于变压器网侧			符号说明	
	电容 C_a (μF)	电阻 R_a (Ω)	电阻功率 $P_{Ra}/(\text{W})$	电容 C_a (μF)	电阻 R_a (Ω)	电阻功率 $P_{Ra}/(\text{W})$		
单相桥式	$29\,000 \frac{\xi I_V}{f U_{V0}}$	$0.3 \frac{U_{V0}}{\xi I_V}$	$\left(\frac{1}{4} \xi I_V\right)^2 R_a$	$29\,000 \frac{\xi I_L}{f U_L}$	$0.3 \frac{U_L}{\xi I_L}$	$\left(\frac{1}{4} \xi I_L\right)^2 R_a$	U_{V0} ——阀侧线电压, V U_L ——网侧线电压, V I_V ——阀侧线电流, A I_L ——网侧线电流, A ξ ——变压器励磁电流对额定电流标么值, 一般为 0.02~0.05 f ——电源频率, Hz	
三相桥式	$17\,320 \frac{\xi I_V}{f U_{V0}}$	$0.17 \frac{U_{V0}}{\xi I_V}$		$17\,320 \frac{\xi I_L}{f U_L}$	$0.17 \frac{U_L}{\xi I_L}$			
三相带 中线	$13\,860 \frac{\xi I_V}{f U_{V0}}$	$0.21 \frac{U_{V0}}{\xi I_V}$						
双星形 带平衡 电抗器	$12\,120 \frac{\xi I_V}{f U_{V0}}$	$0.24 \frac{U_{V0}}{\xi I_V}$	$\left(\frac{1}{5} \xi I_V\right)^2 R_a$			$\left(\frac{1}{5} \xi I_L\right)^2 R_a$		

注 1. 计算公式以 RC 电路星形联结为依据, 当 RC 作三角形联结时, 电容量 C_a , 取星形联结计算值的 1/3, 而电阻 R_a 取星形联结计算值的 3 倍。
2. 在双星形带平衡电抗器电路中, RC 电路应同时接在变压器阀侧的两个星形绕组上。

表 6.1-41 交流侧浪涌过电压抑制用反向阻断式 RC 电路计算公式

电 路	计 算 公 式	符 号 说 明
	$C = (43\,300 \sim 121\,244) \xi I_v / f U_{v0}$	C ——总电容, μF , $C = C_1 + C_2$
	$C_2 \leq 0.1C$	L_1 ——变压器折合到阀侧的每相漏电感, μH
	$C_1 = C - C_2$	R_1 ——串联电阻
	$R_1 = (0.4 \sim 0.8) \sqrt{2L_1/C}$	P_1 —— R_1 功率, W
	$P_1 = (0.02 \sim 0.05 I_{02\varphi})^2 R_1$	R_2 ——放电电阻
	$R_2 = \tau / C_1$	ξ ——见表 6.1-50
	$P_2 = (10 \sim 15) U_{2\varphi} / R_2$	P_2 —— R_2 功率, W
	$I_{VD} = 0.1 I_{02\varphi}$	I_{VD} ——整流器件额定电流, A
	$U_{VD} \geq \sqrt{6} k_{gu} U_{2\varphi}$	$I_{02\varphi}$ ——变压器励磁电流, A
		U_{VD} ——整流器件额定电压, V
		$U_{2\varphi}$ ——变压器励磁电压, V
		k_{gu} ——允许的过电压倍数(一般 $k_{gu} \leq 2$)
		ξ ——见表 6.1-40

3.6.3.3 压敏电阻过电压保护

图 6.1-22 中示出了在变流回路的交直流侧可设置压敏电阻 RV1、RV2 用于过电压保护。其主要优点在于:压敏电阻具有正反向相同的陡峭的伏安特性,在正常工作时只有 1mA 以下的微电流通过元件,而一旦出现过电压时,压敏电阻可通过高达数千安的放电电流,将电压抑制在允许的范围内,并具有损耗低、体积小,对过电压响应快等优点。因此是一种较好的过电压保护元件。在各类晶闸管变流装置中被普遍采用。缺点是:持续平均功率太小(仅数瓦),如果选择不当,在正常工作时将因电压超过其额定值而极易损坏,且损坏时所产生的电弧往往涉及邻近的电气设备,造成故障扩大化。设计、安装选用都应予以注意。交流侧压敏电阻过压保护计算公式见表 6.1-42。

3.6.3.4 换相过电压保护

晶闸管存在载流子集蓄效应,当器件在反向电压作用下其载流子迅速消失恢复阻断时,由于电路电感的作用,在器件两端将出现换相过电压,通常用跨接于晶闸管上的 RC 回

路来抑制(如图 6.1-22 中的 RC3)。在中小功率变流装置中,电容 C 一般为 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{F}$,电阻 R 为 $10 \sim 40 \Omega$ 。

3.6.3.5 过载和短路保护

图 6.1-22 中示出直流快速断路器 QF 和快速熔断器 FU,这是电力电子变流装置中最常用的过电流和短路保护措施。尤其是采用快速熔断器(简称快熔)是电力电子装置中最有效、应用最广的一种过电流保护措施。在选择快熔时应考虑:①电压等级应根据熔断后快熔实际承受的电压来确定;②电流容量应按其主电路中的接入方式和联结形式来确定,快熔一般与电力半导体器件串联连接,在小容量装置中也可串接于阀侧交流母线或直流母线中,表 6.1-43 给出了这三种接入方法的特点及快熔电流容量的选择方法;③快熔的 I^2t 值应小于被保护器件的允许 I^2t 值;④为保证熔体在正常过载情况下不熔化,应考虑其时间-电流特性。

快熔对器件的保护方式可分为全保护和短路保护两种。全保护是指不论过载还是短路均由快熔进行保护,此方式只适用于小功率装置或器件使用裕度较大的场合。短路保护方

表 6.1-42 交流侧压敏电阻保护计算公式

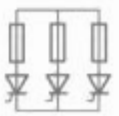
伏安特性和抑制回路	计 算 公 式	符 号 说 明
	$U_{1mA} \geq 1.33 \sqrt{2} U_{2t}$ 三相变压器时 $I_{Rm} = \sqrt{(3/2) K_x I_{02t}}$ 单相变压器时 $I_{Rm} = \sqrt{2 K_x I_{02}}$ $U_{Rm} = K_R I_{Rm}^{1/\alpha}$ $K_{gu} = (U_{Rm} / \sqrt{2}) u_{2t}$ $A = 26.5 U_{1mA} I_{Rm}^{0.5} \times 10^{-6}$ ($\alpha = 20$ 时计算值) $A_{RY} = I_m I_{Rm}^2$ 要求 $A_{RY} \leq 0.8 \text{ A}$	U_{1mA} ——压敏电阻额定电压, V U_{2t} ——变压器二次线电压有效值, V I_{Rm} ——压敏电阻泄放电流值, A K_x ——能量转换系数(空气断路器中 $K_x = 0.3 \sim 0.5$, 油断路器时 $K_x = 0.1 \sim 0.3$) I_{02t} ——三相变压器空载线电流有效值, A I_{02} ——单相变压器空载电流有效值, A U_{Rm} ——压敏电阻的最大电压 α ——压敏元件非线性系数(一般在 $20 \sim 25$ 之间) K_R ——压敏元件特性系数(在取 $\alpha = 20$ 时, $K_R = 1.4 U_{1mA}$) K_{gu} ——过电压倍数,要求 K_{gu} 的计算值应低于晶闸管的电压储备系数 A ——压敏电阻的标称能耗, J I_{pm} ——压敏元件的通流容量, A (指定条件下允许通过的浪涌峰值电流) A_{RY} ——压敏元件的实际能耗, J I_m ——变压器每相励磁电感, H

注 1. 在设计大容量变流装置时,通常选用的压敏元件通流容量 I_{pm} 为该系列同类元件的最大规格值(如最大值为 50 kA),这种情况下 A 、 A_{RY} 值可省略计算。
2. 直流侧压敏电阻的计算方法见表 6.1-42。

式是指快熔只在短路电流较大的区域内起保护作用，此方式需与其他过电流保护措施相配合。因为通常电力电子装置均同时采用几种过载保护措施，除以上两种还有过电流继电器、过电流电子保护电路等，以便提高保护的可靠性和合理性，在选择各种保护措施时应注意相互协调。

综上所述各种过电压、过电流、短路保护电路，在工程设计中还需要根据变流装置主电路方案以及传动电动机容量的大小，电网容量和使用场所实际情况，有目的地选配其中的某些部分，甚至另外增设一定保护措施，如船用环境下针对电磁兼容问题就必须另外设置抗干扰保护措施。

表 6. 1-43 快熔的接入方式与特点

接入方式	特 点	快熔的额定电流 I_{RN}	备 注
	(1)快熔与每一个器件相串联 (2)可靠地保护每一个器件 (3)快熔用量多，价格较高	$I_{RN} \leq 1.57 I_T$	I_T ——器件通态平均电流，A K_c ——交流侧线电流与 I_d 之比 三相零式 $K_c=0.577$ 三相桥式 $K_c=0.816$
	(1)能在交、直流和器件短路时起保护作用 (2)对保护器件的可靠性稍有降低 (3)快熔用量省	$I_{RN} \leq K_c I_d$	I_d ——整流输出电流，A
	(1)直流负载侧故障时动作 (2)器件短路时(内部短路)不能起保护作用	$I_{RN} \leq I_d$	受电路中 L/R 值影响很大

4 自动控制系统

船舶机械电气传动控制技术是随着科学技术的不断发展和生产工艺不断提出新的要求而得以不断发展。在控制方法上，是从手动控制到自动控制；在控制功能上，是从简单的控制设备到复杂的控制系统；在操作方式上，是从笨重繁琐到轻便灵巧；在控制原理上，是从有触点的继电接触式控制系统到以计算机为核心的控制系统。

4.1 继电-接触器控制

4.1.1 继电-接触器控制的特点

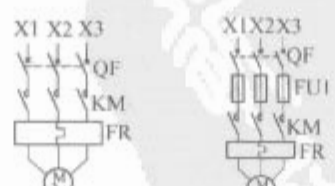
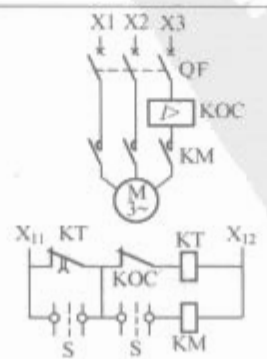
继电-接触器控制系统是历史最悠久的自动控制系统，由于这种控制系统电路图较直观形象、装置结构简单、价格低廉、抗干扰能力强等优点，因此广泛用于各类生产设备及控制系统中。它可以方便地实现简单的、复杂的集中控制、远距离控制和生产过程自动控制。它的缺点主要是由于采用

固定接线形式，其通用性和灵活性较差，在生产工艺提出后才能设计制作，一旦做成后要修改就比较困难，而且不便实现系列生产；由于采用有触点的开关控制，所以工作频率低、易损坏、维修量大、可靠性差等。尽管如此，目前继电器逻辑控制仍然是各类机械设备最基本的电器控制形式之一。

4.1.2 继电器-接触器控制线路

电气传动中的继电器-接触器控制系统的作用是实现系统的供电、起动、正转、反转、制动、调速、指示、报警等运行性能的控制；实现对传动系统的保护(包括电气设备自身保护、被控设备的保护和人身安全保护)；满足生产工艺要求，实现生产机械作业自动化。由于各种生产机械的作业对象和生产工艺不同，所以它们的电气控制线路也不同，但它们有其共同特点就是电气控制系统均由基本的控制环节按照生产工艺的不同要求来组成各自的控制线路。常见继电器-接触器控制环节见表 6.1-44。

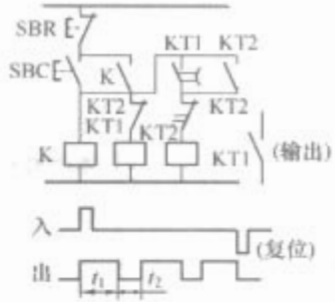
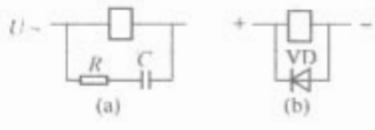
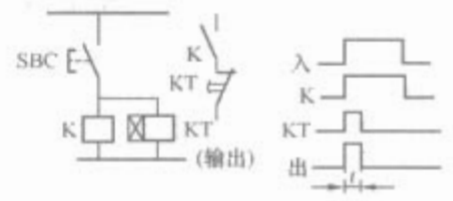
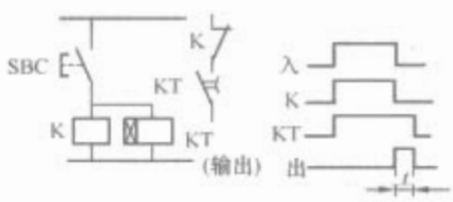
表 6. 1-44 常见继电器-接触器电路

类 型	线 路	简 要 说 明
笼型异步电动机主电路(直接起动，长期或间断长期工作)		(1)采用带电磁脱扣器的低压断路器 QF 做短路保护，热继电器 FR 做过载保护 (2)采用低压断路器 QF 做严重过电流、过载、断相、漏电保护，熔断器 FU1 做短路保护，热继电器 FR 做过载保护 最大允许操作频率低于 30 次/h
笼型异步电动机主电路(重复短时工作)及相应控制线路		采用带电磁脱扣器的低压断路器做短路保护，用堵转继电器 KOC 配合一定的延时动作做过载保护。线路最大操作频率 600/h，堵转继电器的动作电流(I_{σ})按电动机的起动电流(I_n)和正常运转的负载电流(I_L)选取： $I_L \leq I_{\sigma} \leq I_n$ ，继电器 KT 延迟时间应大于电动机起动时间

续表

类 型	线 路	简 要 说 明
直流电动机主电路及相应控制线路(可逆频繁操作)		采用过电流继电器(KOC)、过电压继电器(KOV)、失磁继电器(KP)做过载、短路、过电压及失磁保护。零位继电器 KZ 做操作手柄零位及零电压保护,防止主回路切断、保护电器元件复位后,系统自行启动。低电压继电器 KLV 做低电压保护,继电器释放电压值 U_{α} 按电动机额定电压 U_N 选取 $U_{\alpha}=(0.1\sim 0.2)U_N$
自保持线路		为记忆线路的一种基本型式,用于记忆外部信号
互锁线路		在两个输入信号的线路中,以先动作信号优先,另一信号因受联锁作用而不会动作
先动作优先线路		在数个输入信号的线路中,以最先动作的信号优先,在最先输入的信号除去前,其他信号无法动作
后动作优先线路		在数个信号输入线路中,以最后动作的信号优先,前面动作所决定的状态自行解除
延时复位线路		输入信号加入后有瞬时信号输出,当输入信号解除后经过设定时间 t 后才会停止输出。图(a)为采用通电延时动作的继电器,图(b)为采用断电延时动作的继电器
延时动作延时复位线路		输入信号加入后,经设定时间 t_1 后有信号输出,输入信号解除后经设定时间 t_2 后停止输出信号

续表

类 型	线 路	简 要 说 明
同期动作线路		输入信号加入后, 产生周期变化输出量
干扰抑制电路		图(a)用于交流回路 图(b)用于直流回路
信号发生检测线路		在输入信号发生瞬间产生脉冲输出
信号解除检测线路		在输入信号解除瞬间产生脉冲输出

4.1.3 主要电器元件的选用

4.1.3.1 接触器的选用

(1) 接触器的分类。接触器是继电—接触器控制系统中的主要器件, 用来实现通断电动机主电路和改变其接线状态。按 GB 14048.4 要求, 根据不同的负载条件, 负载类型规定了交直流主回路用控制电器接通和通断能力分类, 详见第 2 篇第 2 章。

(2) 接触器的选用原则。接触器的选用不能只按线路额定电流而不分负载类别选用, 应按以下原则选用:

1) 除了 AC-1 负载外, 用于控制 AC-2、AC-3 负载时, 应按额定电流在规定的操作频率下选用相应额定发热电流的接触器。

2) 由于触头电寿命约与分断电流的 1.6~2.2 次方成反比, 降低容量使用可增加电寿命, 因此用户要求的电寿命次数可以从操作频率及使用期限计算出来。如要求提高电寿命次数, 对于 AC-4 负载可以用降低容量的方法来实现。

3) 用于长期工作制时, 应选用银、银合金或镀银触头的接触器, 如选用铜触头接触器, 则应将其容量降至 8h 工作制额定容量的 50% 以下使用。

4) 用于重复短期工作制时, 应按负载图计算其等效发热(均方根)电流来选择接触器的额定电流。

5) 用于不同工作电压时, 其工作电流可按功率相等原则换算, 但不能超过额定发热电流和额定绝缘电压。

6) 接触器安装于密闭的箱中或环境温度高于额定条件时应适当降容使用, 一般为 1 级, 个别为 2 级。

7) 直流接触器用于高电感负载时应降容使用, 但最小工作电流不得低于按 DC-3 使用类别时额定电流的 20%, 以免磁吹灭弧性能减小而断弧困难。

8) 对于具体产品线路中的交直流接触器应根据主触头回路中负载类别, 主回路的工作电压, 电动机的额定功率以

及吸引线圈电压和联锁触头的数目等合理选择并留有裕量。

4.1.3.2 中间控制继电器的选用

选用电磁式中间控制继电器时, 首先是电磁线圈的电流制(交流或直流)、电压或电流应满足要求, 如控制电源为交流时, 其频率也必须相一致。然后就应按被控对象的电压、电流、负载性质、环境条件、常开、常闭触头数等来选用。若控制电流超过继电器触头额定电流时, 可将触头并联使用, 尽可能让触头对数留有裕量。

4.1.3.3 时间继电器的选用

时间继电器可分为电磁式和电子式两种, 电磁式时间继电器是在电磁式控制继电器上加装气、油阻尼或机械阻尼(如气流阻尼、油流阻或钟表机构等)构成。电子式时间继电器(有数显或无数显)延时范围广、精确度高、调节方便、退回时间短、功耗小、寿命长, 其输出可以是有触点的, 也可以是无触点的, 因而使用越来越广。选用时间继电器时除注意电压、电流、负载性质、环境条件外, 还应注意延时时间范围和延时方式(常开延时或常闭延时)、触头容量、触头对数等。

4.1.3.4 保护用电器元件的选用

常用保护电器元件可按照其功能及保护动作值参照表 6.1-45 选用。

4.1.3.5 主令电器的选用

主令电器是电气控制系统中用于发送或转换控制指令的电器, 是一种用于辅助电路的控制电器。主令电器应用广泛, 种类繁多, 按其作用可分为按钮、行程开关、接近开关、转换开关(组合开关)、主令控制器及其他主令电器、如指示灯、应急按钮、钮子开关等。

(1) 主令电器的一般选用原则。主令电器首先应满足控制电路的电气要求, 如额定电压、额定工作电流、电流种类、额定通断能力、额定限制短路电流等。这些参数的确定

原则与选用主电路开关电器和控制电器相同。其次还应满足控制电路的控制功能要求，如触头类型(常开、常闭、要否延时等)，触头数目及组合形式等。此外，还需要满足一系列特殊要求，这些要求随电器动作原理、防护等级、功能执行组件类型和具体设计不同而有所变异。除了满足控制电路的电气要求外，对电磁兼容性，人身安全及防护等级都必须综合兼顾。所有船用主令电器元件必须满足船用条件，其

绝缘零部件应采用耐潮、耐腐蚀、滞燃无毒材料制造，导电零部件应用铜或铜合金制造，触头必须是银、银合金或镶银制触头。

(2) 按钮和指示灯颜色的选用。按钮和指示灯的选用除遵循主令电器一般选用原则外，在颜色使用时还应按国际规定的相应用途选用，见表 6.1-46。

表 6.1-45 常用保护电器元件选用表

元件类型	功 能 说 明	选 用 方 法
熔断器	作长期工作制电动机的短路保护，一般不做过载保护	(1) 直接起动的笼型异步电动机，其熔体的额定电流(I_{RN})按起动电流 I_s 和起动时间 t_s 选取： $I_{RN}=KI_s$ ，其中，系数 K 按起动时间选择， $K=0.25\sim 0.35$ ($t_s<3s$ 时)， $K=0.4\sim 0.5$ ($t=3\sim 8s$ 时) (2) 降压起动的笼型异步电动机，其熔体额定电流 I_{RN} 按电动机额定电流 I_{MN} 选取： $I_{RN}=1.05I_{MN}$
低压断路器	作电动机的过载及短路保护，并可频繁地接通和分断电路	(1) 低压断路器的额定电流 I_{QN} 按电动机额定电流 I_{MV} 或线路计算电流 I_{IQ} 选取 $I_{QN}\geq I_{MN}$ 或 $I_{QN}\geq I_{IQ}$ (2) 延时制作的过电流脱扣器的额定电流 I_{TN} 按电动机额定电流 I_{MN} 选取 $I_{TN}=(1.1\sim 1.2)I_{MN}$ (3) 瞬时动作的过电流整定值 I_{Qd} 应按大于电动机起动电流 I_s 选取 $I_{Qd}=(1.7\sim 2.0)I_s$ (4) 动作时间必须大于电动机起动或最大过载时间 (5) 对于可调试过电流脱扣器其瞬动整定值的调节范围为(3~6)或(8~12)倍脱扣器额定电流 I_{TN} ，不可调试为(5~10) I_{TN}
热继电器	作长期或间断长期工作制交流异步电动机的过载保护和起动过程的过热保护，不宜作重复短时工作制的笼型异步电动机和绕线转子异步电动机的过载保护，也不宜作舵机电动机的过载保护	按电动机额定电流 I_{MN} 选择热元件额定电流 I_{JN} ，即 $I_{JN}=(0.95\sim 1.05)I_{MN}$ 在较长时间过载 20% 时应可靠动作，此外热继电器的动作时间必须大于电动机的起动或长期 <20% 过载时间
过电流继电器	用于频繁操作的电动机起动及短路保护	(1) 继电器额定电流 I_{JN} 应大于电动机 I_{MN} 即 $I_{JN}>I_{MN}$ (2) 动作电流整定值 I_{jd} 对交流电动机起动电流 I_s 应取 $I_{jd}=(1.1\sim 1.3)I_s$ ；对直流继电器，按电动机最大工作电流 I_{Mmax} 计应取 $I_{jd}=(1.1\sim 1.15)I_{Mmax}$
过电压继电器	用于直流电动机(或发电机)端电压保护	(1) 继电器线圈额定电压 U_{JN} 按系统过电压时线圈两端承受的电压不超过继电器额定电压来选择，一般线圈必须串接附加电阻 R_f ，假定继电器动作电压 U_{jd} 为额定值 U_{JN} 的 40% 及线圈电阻为 R_j 时，计算方法为 $R_f=[(2.75\sim 2.9)(U_{MN}/U_{JN})]R_j-R_j$ 式中 U_{MN} ——电动机额定电压 (2) 过电压动作整定值 U_{jd} 取 $U_{jd}=(1.1\sim 1.15)U_{MN}$
欠电压保护	在交流电源电压降低或消失而使电动机切断后，为防止电源电压恢复时可能引起电动机自行起动，亦用于保护电动机因长时间低压而超载运行	继电器额定电压 U_{JN} 按回路额定电压 U_N 选取，对释放值一般系统无特殊要求
失磁保护	选用欠电流继电器，接于直流电动机励磁回路，以防止电动机失磁而超速	(1) 继电器额定电流 I_{JN} 应大于直流电动机的额定励磁电流 I_{LN} ，即 $I_{JN}\geq I_{LN}$ (2) 继电器释放电流整定值 I_{jf} 按直流电动机的最小励磁电流 I_{Lmin} 整定 $I_{jf}=(0.8\sim 0.85)I_{Lmin}$
超速保护	作电动机或工作机械的最高转速保护	动作稳定值 n_d 按最高工作转速 n_{Mmax} 整定，选取 $n_d=(1.1\sim 1.5)n_{Mmax}$

表 6.1-46 按钮、指示灯颜色选用表

元件类型	功 能 说 明	颜 色	含 义	说 明
按钮	在电气自动控制系统电路中，用于手动发出控制信号以控制接触器、继电器、PLC、电磁起动器等	红	处理事故	紧急停机、火警
			停止 断电	正常停机；切断开关 带有停止或断电功能的复位
		绿	起动 通电	正常起动 接通配电或控制装置投入运行
		黑灰白	无指定意义	除停止或断电含义外的任何意义
		黄	注意	防止意外情况、抑制反常状态，避免可能引起事故的变化
		蓝	按需要而指定意义	凡红、绿、黄三色未包含的，都可以采用蓝色
指示灯	在各类电气设备及电气线路中用作电源指示及指挥信号、预告信号、运行信号、事故信号及其他信号的指示	红	危险报警	断开电源；事故信号；过载信号；倒车；左舷
		绿	正常	接通电源；工作正常；右舷；允许操作；“正车”；“充电”
		白	电源状态 系统状态	有电压；准备工作 中间位置；绝缘监视；“放电”
		黄	注意	防止意外情况 避免可能引起事故的变化
		蓝	指定意义	指定除上列颜色外的任何意义

4.2 无触点控制

随着电力电子器件及微电子技术的发展，近年来，无触点控制技术的应用已日益广泛，并逐步取代有触点控制线路。无触点可广泛用于各种行业，特别适用于防火、防爆、防振的场所，以实现系统对快速、可靠、动作频繁、无火花、无噪声等的特殊要求。其线路构成与有触点控制电路一样。如无触点起动器就是采用晶闸管替代接触点所组成的起动器，当晶闸管是采用全导通控制方式时为直接起动起动器，当晶闸管的控制组件采用了微处理器后，能连续检测电动机电流和发热状态而实现某种控制作用时，又可称之为软起动器(见图 6.1-8)，甚至可做到软停止功能。还有采用固态继电器作为开关器件的线路，也属无触头控制线路。

4.3 可编程序控制器

4.3.1 可编程序控制器的基本特点

可编程序控制器的基本特点是功能齐全完善；编程简便，易于掌握；控制系统构成简单，通用性强；控制系统构成简单、通用性强；电磁兼容性好、可靠性高；便于缩短设

计、施工、投产调试的周期；体积小，维护方便。

4.3.2 可编程序控制系统的工作原理

PLC 控制任务的完成是建立在其硬件的支持下，通过执行反映控制要求的用户程序来实现的，这一点是和计算机的工作原理一致的。因此，可编程控制器的工作原理是建立在计算机工作原理基础上的。

由于早期的 PLC 是从继电器控制系统发展而来的，主要完成的任务是开关量的顺序控制，对被控制对象控制的实现是有关逻辑关系的实现。因此，PLC 并不是单纯像普通计算机那样工作，而是发展了一种叫做巡回扫描的工作机制。

PLC 的巡回扫描是对整个程序巡回执行的工作方式，就是说用户程序的执行不是从头到尾只执行一次，而是执行一次以后，又返回去执行第二次、第三次……直到停机。因此，PLC 可以被看成是在系统软件支持下的一种扫描设备，PLC 开机后，一直在周而复始地循环扫描并执行由系统软件规定好的任务。

4.3.3 可编程序控制系统的组成

可编程序控制器是微机技术和继电器常规控制概念相结合的产物，它按照用户程序存储器中预先编制的控制程序，

表 6.1-47 模块功能说明

序号	模 块	功 能 说 明
1	电源模块	电源模块将交流电源转换成可编程序控制器所需的直流电源，使可编程序控制器能够正常工作。它既可以是外挂的，也可以是内置的(与 CPU 模块、I/O 模块插在同一机架上)。一般情况下，许多 PLC 可以为输入电路和外部的传感器提供直流 24V 的工作电源，但是驱动 PLC 负载的直流电源和交流电源一般由用户提供
2	CPU 模块	同一般的微处理机一样，中央处理单元是可编程序控制器的主要部分，是系统的运算和控制中心。它按照 PLC 系统程序赋予的功能，完成以下任务 (1)接收并存储用户程序和数据 (2)检查电源、存储器、I/O 以及警戒定时器的状态，并能诊断用户程序中的语法错误 (3)当 PLC 投入运行后，以扫描的方式接收现场各输入装置的状态和数据 (4)读取用户程序，经过命令解释后按指令的规定执行逻辑或算术运算 (5)根据用户程序的执行结果，更新有关状态标志位的状态和输出状态寄存器的内容，实现输出控制、制表打印或数据通信等功能 小型 PLC 一般使用 8 位微处理器，而大、中型 PLC 一般采用 16 位或 32 位微处理器。一般中型可编程序控制器多为双处理器系统，即字处理器和位处理器，其中字处理器是主处理器，由它处理字节操作指令，控制系统总线、内部计数器、内部定时器，监视扫描时间，统一管理编程接口，同时协调位处理器及输入输出。位处理器也称从处理器，主要作用是处理位操作指令(布尔运算)和在其操作系统的管理下实现编程语言向机器语言的转换。位处理器一般为各厂家设计制造的专用芯片，是加快控制器工作处理速度的关键所在

续表

序号	模 块	功 能 说 明
3	输入/输出模块	通常, 将 PLC 的信号输入模块和信号输出模块简称为输入/输出模块(I/O 模块)。输入/输出模块是 PLC 的 CPU 模块与外部控制现场相联系的桥梁。PLC 的输入/输出模块通常可分为开关量输入模块、模拟量输入模块、开关量输出模块和模拟量输出模块等, 分别用于联系不同类型的外部信号。输入模块用来接收和采集输入信号, 开关量输入模块用来接收从按钮、选择开关、数字拨码开关、限位开关、接近开关、光电开关、压力继电器等来的开关量输入信号; 模拟量输入模块用来接收电位器、测速发电机和各种变送器提供的连续变化的模拟量电流电压信号。开关量输出模块用来控制接触器、电磁阀、电磁铁、指示灯、数字显示装置和报警装置等输出设备, 模拟量输出模块用来控制电动调节阀、变频器等执行器
4	特殊 I/O 模块	大型 PLC 中还有一类特殊 I/O 模块, 如高速计数模板、PID 控制模板、中断控制模板等, 一般是为了提高 PLC 的实时控制功能和过程控制功能而专门设计的。这些模板本身就是一个独立的计算机系统, 有自己的 CPU、系统程序和存储器, 它们通过系统总线与 PLC 的 CPU 相连接, 并在 CPU 模板的协调管理下独立地进行工作
5	通信接口模块	几乎所有的 PLC 都具备联网通信能力。在实际的控制系统中, 由于控制对象的增加、控制功能的复杂, 就可能由两台或多台 PLC 组成复杂的控制系统; 在有些情况下, 也需要由 PLC 和其他的计算机组成控制系统。在上述情况下, PLC 之间、PLC 与其他计算机之间的数据交换就是整个系统中不可缺少的部分。为了方便用户使用, 各公司都开发了自己的通信接口和数据通信模块, 只需要少量的用户程序就可以实现系统间的通信

通过输入接口采入现场信息, 执行逻辑和数值运算, 进而通过输出接口控制各种执行机构动作。作为一个以微处理器为核心的用作数字控制的特殊计算机, 它的硬件配置与一般微机装置类似, 主要由中央处理单元(CPU 模块)、信号输入/输出模块、电源模块和编程设备等部分组成, 如图 6.1-24 所示, 其功能见表 6.1-47 所示。

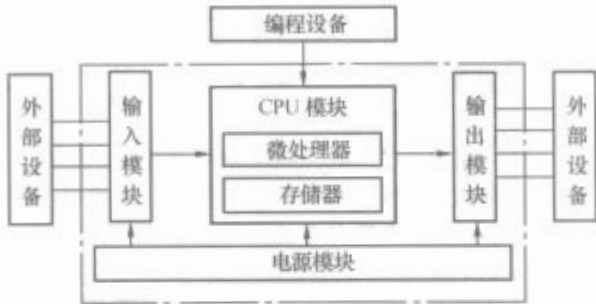


图 6.1-24 可编程序控制系统的基本组成

4.3.4 可编程序控制器的编程语言

IEC 1131-3 标准中定义了 5 种 PLC 编程语言的表达方式: 梯形图 LAD(Ladder Diagram)、语句表 STL(Statement List)、功能块图 FBD(Function Block Diagram)、结构文本 ST(Structured Text)、顺序功能图 SFC(Sequential Function Chart), 这 5 种编程语言较常见的为前 3 种。

4.3.4.1 梯形图

梯形图具有形象、直观的特点, 为广大电气工程技术人员所熟悉, 特别适用于开关量逻辑控制, 是 PLC 的主要的编程语言。有时把梯形图也称为电路和程序。

图 6.1-25 所示是一个继电器控制电路图与相应梯形图的比较示例。可以看出, 梯形图是用图形符号连接而成, 这些符号与继电器控制电路图中的动合触点、动断触点、并联连接、串联连接、继电器线圈等是相对应的, 每一个接点和线圈对应有一个编号。梯形图是在传统的电器控制系统电路图的基础上演变而来的, 在形式上类似于电器控制电路, 由

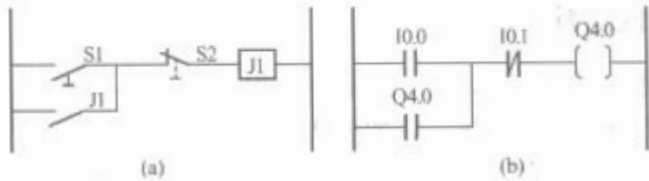


图 6.1-25 电器控制电路图与梯形图比较
(a) 电气控制电路图; (b) 梯形图

触点、线圈和用方框表示的功能块等组成, 触点和线圈等组成的独立电路称为网络(Network)。触点: 代表逻辑输入条件, 如外部的开关、按钮和内部条件等。线圈: 代表逻辑输出结果, 用来控制外部的负载或内部的输出条件。功能块: 用来表示计数器、计数器或者数学运算等功能指令。

在分析梯形图中的逻辑关系时, 为了借用继电器电路图的分析方法, 可以想象在梯形图的左右两侧垂直“电源线”之间有一个左正右负的直流电源电压, 当图中 I0.0 与 I0.1 (非) 的触点同时接通, 或 Q4.0 与 I0.1 (非) 的触点同时接通时, 有一个假想的“能流”(Power Flow)流过 Q4.0 的线圈。利用能流这一概念, 可以帮助我们更好地理解和分析梯形图, 能流只能从左向右流动。如果没有跳转指令, 在网络中, 程序中的逻辑运算按照从左往右的方向执行, 与能流的方向一致。网络之间按照从上到下的顺序执行, 执行完所有的网络后, 下一次循环返回最上面的网络重新开始执行。

4.3.4.2 指令表

PLC 的指令又叫做语句, 若干条指令组成的程序叫做语句表程序, 每条语句表示给 CPU 一条指令, 规定 CPU 如何操作。语句表比较适合经验丰富的程序员使用, 可以实现某些不能用梯形图或功能块图表示的功能。与图 6.1-25 所示电路图相对应的语句表见图 6.1-26。

AI		
O	I	0.0
O	Q	4.0
)	
AN	J	0.1
	Q	4.0

图 6.1-26 语句表

可以看出, PLC 的语句表是与微机的汇编语言中指令相似的助记符表达式, 它是由操作码和操作数两部分组成。

操作码: 用助记符表示, 它表明 CPU 要完成的某种操作功能。操作数: 包括为执行某种操作所必须的信息。

4.3.4.3 功能块图

功能块图(FBD)使用类似于布尔代数的图形逻辑符号来表示控制逻辑。一些复杂的功能(例如数学运算功能等)用指令框来表示, 有数字电路基础的人很容易掌握。图 6.1-27 中的控制逻辑与图 6.1-25 和图 6.1-26 中的相同。西门子公司“LOGO!”系列微型 PLC 使用功能块编程, 除此之外, 国内很少有产品使用功能块图语言。

功能块图用类似于与门、或门的方框来表示逻辑运算, 方框的左侧为逻辑运算的输入变量, 右侧为输出变量, 输入、输出端的小圆圈表示“非”运算, 方框被“导线”连接在一起, 信号自左向右流动。



图 6.1-27 功能模块

4.3.5 可编程序控制系统设计的基本原则与步骤

4.3.5.1 可编程序控制系统设计的基本原则

PLC 是一种计算机化的高科技产品，相对继电器而言价格相对较高。因此，在应用 PLC 之前，首先应考虑是否有必要使用 PLC。如果被控系统很简单，I/O 点数很少，或者 I/O 点数虽多，但是控制要求并不复杂，各部分的相互联系也很少，就可以考虑采用继电器-接触器控制的方法，而没有必要使用 PLC。

在下列情况下，可以考虑使用 PLC：

- (1) 系统的开关量 I/O 点数很多，控制要求复杂。如果继电器控制，需要大量的中间继电器，时间继电器、计数器等器件。
- (2) 系统对可靠性的要求高，继电器控制不能满足要求。
- (3) 由于生产工艺流程或产品的变化，需要经常改变系统的控制关系，或需要经常修改多项控制参数。
- (4) 可以用一台 PLC 控制多台设备的系统。

任何一种电气控制系统都是为了实现被控对象（生产设备或生产过程）的工艺要求，以提高生产效率和产品质量。因此，确定选用 PLC 控制系统后，在设计 PLC 控制系统时应遵循以下基本原则：

- (1) 最大限度地满足被控对象的控制要求。
- (2) 在满足控制要求的前提下，力求使控制系统简单、经济，使用及维修方便。
- (3) 保证控制系统的安全、可靠。
- (4) 考虑到生产的发展和工艺的改进，在选择 PLC 容量时，应适当留有裕量。

4.3.5.2 可编程序控制系统设计的一般步骤

可编程序控制系统设计的步骤见表 6.1-48。

表 6.1-48 设计步骤

序号	名称	设计说明
1	熟悉控制对象	这一步是系统设计的基础。首先应详细了解被控对象的全部功能和它对控制系统的要求，例如机械的动作、机械、液压、气动、仪表、电气系统之间的关系，系统是否需要多种工作方式（如自动、半自动、手动等），PLC 与系统中其他智能装置之间的关系，是否需要通信联网功能，是否需要报警，电源停电及紧急情况处理等。 在这一阶段，还要选择用户输入设备（按钮、操作开关、限位开关、传感器等）、输出设备（继电器、接触器、信号指示灯等执行元件），以及由输出设备驱动的控制对象（电动机、电磁阀等）。 此时，还应确定哪些信号需要输入给 PLC，哪些负载由 PLC 驱动，并分类统计出各输入量和输出量的性质，是开关量还是模拟量，是直流还是交流，以及电压的大小等级，为 PLC 的选型和硬件提供依据。
2	确定硬件配置，设计外部接线图	正确选择 PLC 对于保证整个控制系统的技术与经济性能指标起着重要的作用。选择 PLC，包括机型的选择、容量的选择、I/O 模块的选择、电源模块的选择等。 根据被控对象对控制系统的要求，及 PLC 的输入量、输出量的类型和点数，确定出 PLC 的型号和硬件配置。对于整体式 PLC，应确定基本单元和扩展单元的型号；对于模块式 PLC 应去定框架（或基板）的型号，及所需模板的型号和数量。PLC 硬件配置确定后，应对 I/O 点进行分配，确定外部输入输出元件与 PLC 的 I/O 点的连接关系，完成 I/O 点地址定义表。分配好与各输入量和输出量相对应的元件后，设计出 PLC 的外部接线图、其他部分的电路原理图、接线图和安装所需的图纸，以便进行硬件装配。

续表

序号	名称	设计说明
3	设计控制程序	在硬件设计的基础上，通过控制程序的设计完成系统的各项控制功能。 对于较简单系统的控制程序，可以使用经验设计法直接设计出梯形图。对于比较复杂的系统，一般要首先画出系统的工艺流程图，然后再设计 PLC 的控制梯形图。 编制程序就是通过编程器用编程语言来实现控制功能框图对应的程序，这是整个程序设计工作的核心部分。 如果有操作系统支持，尽量使用编程语言高级形式，如梯形图语言。在编写过程中，根据实际需要，对中间标志信号表和存储单元表进行逐个定义，要注意留出足够的公共暂存区，以节省内存的使用。 由许多小型 PLC 使用的是简易编程器，只能输入指令代码。梯形图设计好以后，还需要将梯形图按指令语句编出代码程序，列出程序清单。在熟悉所选 PLC 指令系统后，可以很容易地根据梯形图写出语句表程序。 编写程序过程中要及时对编出程序进行注释，以免忘记其间的相互关系。注释应包括程序功能、逻辑关系、设计思想、信号的来源和去向等的说明，以便于程序的阅读和调试。
4	程序调试	控制程序是控制整个系统工作的软件，是保证系统工作正常、安全、可靠的关键。因此，控制系统的设计必须经过反复调试、修改，直到满足要求为止。程序的调试可以分为两步。 (1) 模拟调试 用户程序一般先在实验室进行模拟调试，实际的输入信号可以用按钮开关和按钮来模拟，各输出量的通断状态用 PLC 上有关的发光二极管来显示，一般不用接 PLC 实际的负载（如接触器、电磁阀等）。实际的反馈信号（如限位开关的接通等）可以根据流程图，在适当的时候用开关或按钮来模拟。 调试应充分考虑各种可能的情况。系统的各种不同的工作方式，有选择序列的流程图中的每一条支路，各种可能的进展路线，都应逐一检查，不能遗漏。发现问题后及时修改程序，直到在各种可能的情况下输入量与输出量之间的关系完全符合要求。如果程序中某些定时器或计数器的设定值过大，为了缩短调试时间，可以在调试时将它们减小，模拟调试结束后再写入它们的实际设定值。 (2) 现场调试 现场调试要等到系统其他硬件安装和接线工作完成后才能进行。在设计和模拟调试程序的同时就可以设计、制作控制台或控制柜，PLC 之外的其他硬件的安装、接线工作也可以同时进行，以缩短整个工程的周期。完成以上工作后，将 PLC 安装到控制现场，进行联机总调试，并及时解决调试时发现的软件和硬件方面的问题。
5	编制技术文件	系统调试好后，应根据调试的最终结果，整理出完整的技术文件，如硬件接线图、功能表图、带注释的梯形图以及必要的文字说明等。

4.4 随动系统

随动系统是由若干元件和部件组成并具有功率放大作用的一种自动控制系统。它的输出量总是相当精确地跟随输入量的变化而变化，或者说，它的输出量总是复现输入量。随动系统又称伺服系统。若被控制量是位置，则称之为位置随动系统。位置指令与被控制量可以是直线位移或角位移。

随动系统在船舶机械控制中亦有广泛的应用,例如火炮控制、仪表的自动稳定控制、雷达天线控制、调距桨控制、减摇鳍控制、转舵控制等都多采用随动系统。随动系统之所以被广泛应用,是因为它在一定程度上能按照人们的愿望去完成所要求的控制规律。它不仅能完成人们无法直接参与的控制任务,并且能达到人们直接控制无法达到的快速性与高精度。其分析和设计的重点应是系统跟随的快速性、准确性和稳定性。

4.4.1 随动系统的基本结构形式

随动系统的基本职能是对信号进行功率放大,保证有足够能量推动负载(被控对象)按输入信号的规律运动(即输出),并使输入与输出之间的偏差不超过允许的误差范围。

按误差控制的随动系统的基本结构形式可用图 6.1-28 来表示。



图 6.1-28 随动系统的基本结构框图

从图 6.1-28 中可以看出,整个系统由误差测量装置、信号放大装置、执行机构、校正装置等部分组成。图中 φ_r 表示系统的输入信号(又称参考输入), φ_c 表示系统的输出。系统的误差 θ 见式(6.1-32)

$$\theta = \varphi_r - \varphi_c \tag{6.1-32}$$

误差测量装置又称比较元件,它的作用是将系统的输入 φ_r 与输出 φ_c 之间的差值 θ 随时测量出来,并将误差信号 θ 转换成电信号 u_θ 送入放大装置。放大装置将误差电压 u_θ 进行必要的变换与功率放大之后,驱动执行元件,使执行元件通过减速器(若执行元件用力矩电机,而且力矩足够大时,则可省去减速器)拖动被控对象,按照输入信号 φ_r 的规律运动。校正装置的作用是补偿系统中存在的电磁与机电惯性所引起的滞后作用,使系统的输出信号 φ_c 能即时跟随输入信号 φ_r 的变化,以满足系统的动态品质要求。

4.4.2 随动系统的分类

随动系统的分类见表 6.1-49。

表 6.1-49 随动系统的分类

序号	分类方式	名 称	说 明
1	按系统控制方式分类	误差控制系统	该系统的特点是系统运动的快慢取决于误差信号的大小。当系统的误差信号为零时(即系统输出量与输入量完全相等),系统便处于静止
		复合控制系统	该系统即按输入信号微分和系统误差综合控制的系统。它的特点是系统的运动取决于输入信号的变化率(包括输入速度和加速度)和系统误差信号的综合作用
2	按组成系统元件的物理性质分类	机-电随动系统	组成该系统的元件除机械部件外,均是电磁或电子元件。由于执行元件有交流伺服电机与直流伺服电机之分,又将电气随动系统分为直流随动系统和交流随动系统。小功率随动系统多采用机-电随动系统
		机-电-液压随动系统	该系统的误差测量装置与前级放大部分是电气的,而系统的功率放大与执行元件则是液压的。船舶设备的控制系统往往功率较大,电液随动系统应用较为广泛
		机-电-气动随动系统	系统的误差测量与前级放大部分是电气的,而执行元件是气动的

续表

序号	分类方式	名 称	说 明
3	按系统信号特点分类	连续随动系统	系统中传递的电信号是连续的,而不是离散的
		数字随动系统	该系统中传递的电信号有离散的脉冲数字信号。当然,数字信号有时还得变成模拟信号去驱动执行元件。所以,这种系统必须有模-数(A/D)、数-模(D/A)转换器。系统的运动是靠数字量来控制的
		脉冲-相位随动系统	该系统又称锁相随动系统。这种系统的特点是输入信号为指令方波脉冲,输出也转换成方波脉冲,按输入与输出方波脉冲之相位差来控制系统的运动
4	按系统部件输入-输出特性的不同分类	线性随动系统	该系统各部件的输入-输出特性在正常工作范围内均是线性关系
		非线性随动系统	该系统中含有输入-输出特性是非线性的,不可能存在那种理想的线性系统,因为组成系统的某些元部件总是存在较小的不灵敏区(或称死区),并有饱和界限。但是,只要不灵敏区处在系统允许误差范围之内,而且系统正常工作时,没有进入饱和界限,则称该系统是线性系统。只有系统在正常工作时,其元部件的输入-输出特性存在非线性关系时,才称该系统为非线性系统

4.4.3 随动系统的误差测量

由于随动系统的用途不同,精度要求各异,因而选用的检测装置类型十分繁杂,表 6.1-50 为传感器的分类表:

表 6.1-50 传感器的分类

分类	转换原理	传感器名称	典型应用
电阻式	移动触点改变电阻	电位计	位移
	改变电阻丝的尺寸	金属丝应变片	力、负荷
	改变电阻片的电阻率	半导体应变片	力、负荷
	利用电阻的温度效应	热电阻、热敏电阻	温度、辐射热
	利用电阻的气体效应	气敏电阻	煤气、可燃气体
	利用电阻的光敏效应	光敏电阻	光强
	利用电阻的湿度效应	湿敏电阻	湿度
电容式	改变电容的几何尺寸	电容传感器	位移、压力
	改变电容的介电常数	电容传感器	液位、厚度、含水量
电感式	改变磁路几何尺寸	电感传感器	位移、压力
	改变导磁体位置	电感传感器	位移、压力
	利用涡流去磁效应	涡流传感器	位移、厚度
	利用压磁效应	压磁传感器	力、压力
	改变互感系数	差动变压器	位移
		自整角机 旋转变压器	位移
频率式	改变谐振回路的参数	振弦式压力传感器	压力、力
		振筒式气压传感器	气压
		石英谐振式传感器	压力

续表

分类	转换原理	传感器名称	典型应用
电参数传感器	利用莫尔条纹	光栅传感器	大角位移
	改变互感系数	感应同步器	大直线位移
	利用拾磁信号	磁栅传感器	
	利用数字编码	角度编码器	大角位移
电量传感器	温差电势	热电偶	温度、热流
	霍尔效应	霍尔片	磁通、电流
	电磁感应	磁电传感器	速度
	光电效应	光电池	光强
	光致电子发射	光发射管	光强、放射性
	辐射电离	电离室	离子计数、放射强度
	压电效应	压电传感器	力、压力、加速度

4.4.4 随动系统的设计

随动系统的设计步骤见表 6.1-51。

表 6.1-51 随动系统的设计步骤

序号	设计步骤	说 明
1	初步设计	从调查研究、分析设计任务开始,包括给系统提出具体要求,确定初步方案,选择元部件,拟定整个系统的原理线路图。通过初步分析,确定系统的放大倍数和校正装置的型别及其参数,以便初步满足系统性能指标的要求
2	原理试验	根据初步设计所确定的原理线路建立实验模型,或者直接建立系统的原型进行试验。按照试验的结果调整系统的参数,并排除出现的故障,对原定方案进行局部的甚至全部的修改,进一步完善初步设计
3	样机生产	在原理试验的基础上,考虑到实际的工艺结构、安装、使用、维修等条件,进行样机生产。通过生产、调整,最后检验其是否全面满足设计指标的要求,直到完全合格后才能定型并投入使用

4.4.4.1 设计指标

拟定设计指标是设计工作的一项重要任务。因为,控制系统的性能指标是设计控制系统的依据,只有设计指标拟定得正确而且合理,才能有好的设计结果。要搞好设计,设计人员必须经常深入实践,仔细了解情况,掌握第一手的材料,才能制定出切实可行的设计要求。

4.4.4.2 控制方案和元件选择

(1) 选择控制方案的目的是为控制系统选择合适的结构形式,大体上决定组成系统的主要元部件。选择控制方案需要考虑的因素很多,如国家的技术和工艺水平,实现的可能性,经济效果,可提供的能源和元件种类等,需经过反复比较选择决定。控制方案比较见表 6.1-52。

表 6.1-52 控制方案比较

序号	名 称	说 明
1	开环控制或闭环控制	闭环控制具有抗干扰能力,对系统参数变化不太敏感,控制精度高、响应速度快,但要考虑稳定性问题,且设备成本高
		开环控制不存在稳定性问题,但不具有抗干扰能力,控制精度和响应速度取决于各环节或元件的性能,控制精度低,设备成本较低
		对于闭环稳定性难以解决、响应速度要求较快、控制精度要求不太高、外扰较小、功率较大、要求成本较低的场合,可以选择开环或局部闭环控制方式

续表

序号	名 称	说 明
2	模拟控制或数字控制	模拟式控制系统较传统,而且目前仍普遍使用。除脉宽调制式伺服阀,目前工业上采用的伺服阀仍然是模拟式的,与之相配的放大器也是模拟式的。模拟式系统分辨率和控制精度相对较低
		检测元件、控制元件全部数字化,并由计算机控制的系统才是全数字系统 目前工程上采用的高精度高响应电液伺服系统属于混合型数字系统,即伺服阀及放大器仍为模拟式,检测元件为数字式的高精度响应传感器(如磁尺、编码器、解算器等)并采用计算机控制的系统;放大器为功率放大器,其前加 D/A 转换器,前置放大功能可改由计算机实现

(2) 测量元件选择时应考虑其精度、工作线性范围、线性度好、灵敏度高、摩擦力矩和惯性。交流测量元件还要求它的谐波成分尽可能小。

(3) 执行元件的选择,一般是根据随动系统输出功率的大小来选择。见表 6.1-53。

表 6.1-53 执行元件的选择

序号	功率范围	说 明
1	系统所需功率在 1W 以下	宜采用交流两相杯形转子电动机。因为这种微型电动机摩擦力矩很小,微动电压小,很灵敏,调速范围广,运转平稳,对无线电无干扰,转动惯量小且维护方便
2	系统所需的功率在 100W 以下	宜采用交流两相笼型异步转子电动机或直流伺服电动机
3	系统所需功率大于 100W、小于 20kW	采用直流电动机:直流电动机的启动力矩大,约为额定力矩的 3~7 倍,调速性能好,低速平稳性好 采用交流电动机:交流电动机结构简单,维护方便,价格低廉 采用电动机功率较大时要重视电磁兼容性要求
4	系统所需功率大于 10kW 以上	多采用液压执行元件:液压马达和液压油缸的力矩可以很大,直接结构简单,调速性能好,低速平稳性好。要重视油污问题

(4) 驱动电动机的功率放大元件的选择,根据所要驱动的电动机的不同,功率放大元件分为直流伺服功率放大器和交流伺服功率放大器两种,前者驱动直流电动机,后者驱动交流电动机。控制系统中应用最广泛的功率放大元件是直流功率放大器,常用的直流功率放大器有三种:线性(比例式)功率放大器、开关式功率放大器和晶闸管功率放大器。

一般功率为 100W 以下时可以选用线性功率放大器,75W 以上时可采用大功率晶体管、晶闸管、自关断 IGBT、电力 MOSFET、IGBT 等电力电子器件为核心的斩波器、变频器之类的功率放大器。

减速器减速速比的选择:随动系统中,从执行机构的输出轴到负载之间通常都要有减速器。通常减速器总速比取 $Z = \sqrt{J_L / J_M}$,这里的 J_L 、 J_M 分别为负载总转动惯量和电动机自身转动惯量。

4.4.4.3 机、电、液系统中的典型环节实例及其传递函数

机、电、液系统中的典型环节及其传递函数见表 6.1-54。

4.4.4.4 系统分析

系统分析的思路见表 6.1-55。

表 6.1-54 典型环节及其传递函数

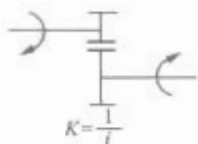
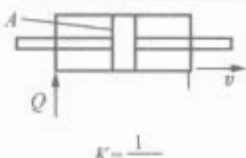
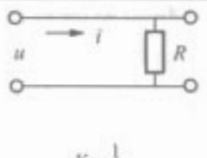
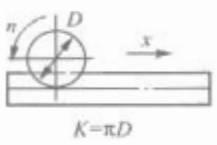
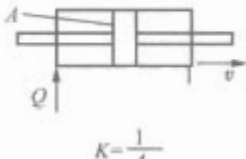
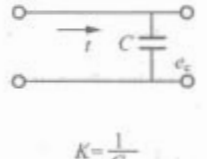
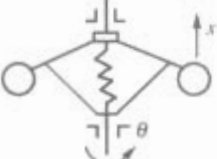
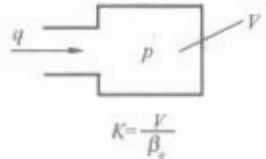
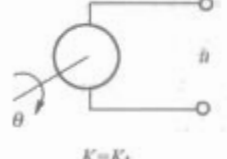
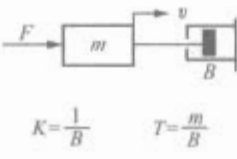
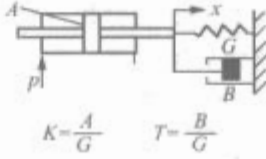
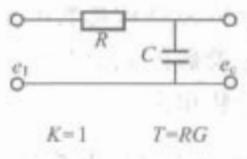
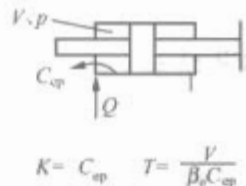
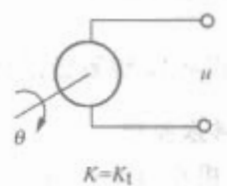
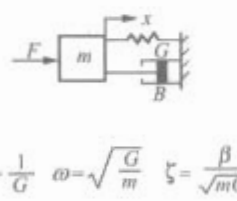
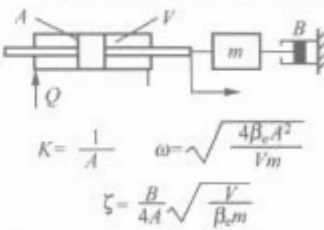
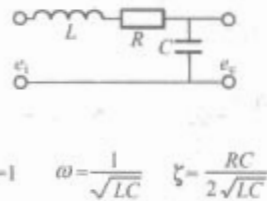
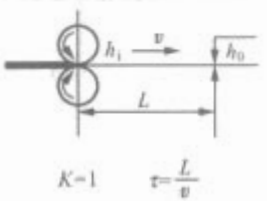
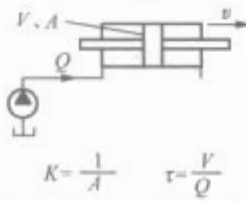

名称及传递函数	机 械 例	液 压 例	电 例
比例环节 $G(s) = K$	 $K = \frac{1}{l}$	 $K = \frac{1}{A}$	 $K = \frac{1}{R}$
积分环节 $G(s) = \frac{K}{s}$	 $K = \pi D$	 $K = \frac{1}{A}$	 $K = \frac{1}{C}$
微分环节 $G(s) = Ks$	 $K = \frac{1}{B}$	 $K = \frac{V}{B_e}$	 $K = K_L$
惯性环节 $G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$	 $K = \frac{1}{B} \quad T = \frac{m}{B}$	 $K = \frac{A}{G} \quad T = \frac{B}{G}$	 $K = 1 \quad T = RG$
一阶微分环节 $G(s) = K(Ts + 1)$	—	 $K = C_{op} \quad T = \frac{V}{B_e C_{op}}$	 $K = K_L$
振荡环节 $G(s) = \frac{K}{\frac{s^2}{\omega^2} + \frac{2\zeta}{\omega}s + 1}$	 $K = \frac{1}{G} \quad \omega = \sqrt{\frac{G}{m}} \quad \zeta = \frac{B}{2\sqrt{mG}}$	 $K = \frac{1}{A} \quad \omega = \sqrt{\frac{4B_e A^2}{Vm}} \quad \zeta = \frac{B}{4A} \sqrt{\frac{V}{B_e m}}$	 $k = 1 \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \zeta = \frac{RC}{2\sqrt{LC}}$
延迟环节 $G(s) = Ke^{-\tau s}$	 $K = 1 \quad \tau = \frac{L}{v}$	 $K = \frac{1}{A} \quad \tau = \frac{V}{Q}$	

表 6.1-55 系统分析思路

内 容	说 明
建立数学模型	对于典型的位置、速度和力伺服系统可直接引用已有的数学模型，对于特殊需要的系统，可采用同样的分析思路和方法建模 对于工程系统，常用系统数模形式有：系统运动微分方程组或拉氏变换方程组、系统方块图、系统开环或闭环传递函数、系统开环或闭环频率特性等。对于多输入多输出系统，在采用状态方程建模时应根据系统实际情况进行必要而合理的简化，以便数模能反映系统本质又不至于复杂化
拟定各环节参数	根据系统组成、动力元件设计及元件参数等，计算并确定各环节的静态或动态的参数数值得数模（框图、传递函数或频率特性）
系统性能分析	稳定性分析 通过稳定性分析，确定系统的稳定裕量和开环增量
	动态响应分析 通过动态响应分析，确定开环穿越频率、闭环频率或响应时间、过渡过程时间
	精度分析 通过精度分析，计算各种稳态误差，确定各部分的误差分配和增益分配
	注意事项 (1) 性能分析时应特别注意主要参数的变化及其性能的影响 (2) 如性能达不到要求，应考虑增加校正环节 (3) 如加校正后仍难以达到要求，应考虑性能指标是否合理，并重新系统设计
系统校正	校正方案 采用比例或比例积分放大器时，如果通过调整开环增益或主要结构参数，系统性能仍达不到性能指标，则应采取校正措施。适合伺服系统的校正类型较多，常用的串联校正有 PID 调节器；并联校正有速度、加速度、静压或动压反馈等。采用哪类校正要根据系统的组成、结构和参数情况而定
	加校正后的性能分析 校正环节的传递函数形式及参数，要根据系统性能分析结果而定；加入校正环节后，应对系统性能进行重新分析，直至性能指标满足要求

4.4.4.5 系统数字仿真

(1) 仿真的必要性。工程上为简化分析,系统建模及分析中作了一些必要的假设和简化,忽略了一些次要因素和非线性因素,所得的频域分析结果是近似的。对于结构复杂、性能要求高或应用场合重要的系统,有必要进行系统数字仿真。

(2) 仿真的方便性。随着计算机技术及软件的飞速发展,由 Matrix Laboratory 开发的 MATLAB 软件被移植和扩展成方便的控制系统的仿真软件, MATLAB 软件相当方便,只须将有关结构参数写入微分方程、方块图、传递函数或频率特性中,一按执行便可得到波特图、闭环频率特性或阶跃响应曲线,并得到相应的有关性能指标。这样一来,系统设计者无须为计算方法和编程而困扰,只须把精力集中到系统建模、系统设计上。

(3) 仿真的真实性与局限性。数字仿真只是一个工具,其结果的真实性与准确性取决于数学模型的真实性和边界条件及数据以及结构参数的准确性。仿真离不开系统分析,仿真时许多参数的取值范围有赖于系统频域分析的结果;而且仿真的分析也离不开频域分析和时域分析的物理概念。

5 船舶电气传动系统的计算机控制

5.1 计算机控制系统的组成、基本原理与特点

5.1.1 基本原理

计算机在自动控制中的基本应用是直接参与控制,承担控制系统中控制器的任务,从而形成计算机控制系统。如图 6.1-29 所示。

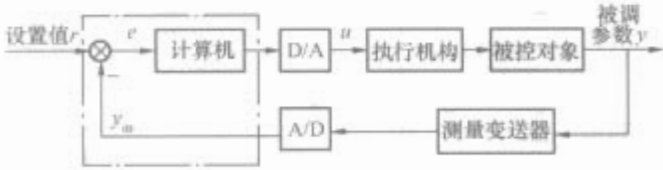


图 6.1-29 单回路计算机控制系统示意图

5.1.2 组成

计算机控制系统中的计算机是广义的,可以是工业控制计算机、嵌入式计算机、可编程序控制器 (PLC)、单片微机系统、数字信号处理器 (DSP) 等。计算机控制系统由两个基本部分组成,即硬件和软件系统。硬件指计算机本身及其外部设备。软件是指管理计算机的程序及生产过程应用程序。只有软件和硬件有机地结合,计算机控制系统才能正常运行。

5.1.3 计算机控制系统的主要特点

(1) 能有效地克服随机扰动。系统运行过程中,多数扰动是难以预知的,因此模拟调节器很难保证控制质量。计算机参与控制后,可根据实时检测到的数据,用自动校正算法估计过程状态,进而自动调整控制信号,保证在扰动出现时仍能达到满意的控制效果。

(2) 数字信号的传递可以有效地抑制噪声,从而提高了系统抗干扰能力。

(3) 由数字计算机构成的数字控制器,控制规律由软件实现,因此通常不需要改动硬件,只要修改程序,就可以适应新的控制要求。

(4) 可用一台计算机分时控制若干个回路或系统,提高设备的利用率,经济性好。

(5) 控制与管理结合,实现企业综合自动化。特别是计算机通信技术的发展,从收集商品信息、信息资料、制定企

业战略计划和生产计划、控制生产过程、生产调度、仓库管理到产品销售都实现微机化,使得企业的自动化程度进一步提高。

5.1.4 计算机控制系统的分类

从应用功能、控制目的和系统构成角度来讲,计算机控制系统分为:监视控制与数据采集系统(操作指导控制系统)、直接数字控制系统、监督控制系统、集散控制系统、现场总线控制系统和计算机集成制造系统等。详见表 6.1-56。

表 6.1-56 计算机控制系统的分类

序号	类型	说明
1	监视控制与数据采集系统	监视控制与数据采集系统(SC&DAS, Supervisory Control and Data Acquisition System)主要是采集生产过程或各种检测装置的参数,并对参数进行处理,进行参数的越限报警,或者按要求定时制表、打印或将数据处理的结果记录在外存储器中,作为资料保存或供分析使用。SC&DAS 也由于常常在开环控制系统中起操作指导作用而称为操作指导控制系统。在操作指导控制系统中,计算机的输出不直接作用于生产对象,属于开环控制结构。计算机根据数学模型、控制算法对检测到的生产过程参数进行处理,计算出各控制量应有的较合适或最优的数值,供操作员参考,这时计算机就起到了操作指导的作用。SC&DAS 的优点是结构简单、控制灵活。缺点是要由人工进行操作,操作速度受到了人为的限制,并且不能同时控制多个回路。该系统常用在计算机控制系统设计与调试阶段,进行数据检测、处理及试验新的数学模型、调试新的控制程序等
2	直接数字控制系统	直接数字控制系统(DDCS, Direct Digital Control System)是计算机应用在工程控制中最普遍和最基本的一种方式。DDCS 中的计算机完全取代模拟调节器参加闭环控制过程。它用一台微机对被控参数进行巡回检测,将检测结果与设定值进行比较,再根据规定的 PID 规律、模糊逻辑规律或其他控制规律进行运算,最后输出到执行机构对生产过程进行控制,使被控参数稳定在给定量上。一般的直接数字控制系统有一个功能齐全的运行操作台,系统的给定、显示、报警等集中在此操作台上
3	计算机监督控制系统	在 DDCS 中,对生产过程产生直接影响的被控参数给定值是预先设定并存在控制器(计算机)内存中的,这个给定值不能根据过程条件和生产工艺信息的变化及时修改。计算机监督控制系统(SCCS, Supervisory Computer Control System)是两级控制系统:第一级:监督控制,第二级:直接控制。SCCS 中的监督计算机由于承担上一级控制与管理任务,要求其数据处理功能强,存储容量大
4	集散控制系统	集散控制系统(DCS, Direct Digital Control System)就是企业经营管理 and 生产过程控制分别由几级计算机进行控制,实现分散控制、集中管理的系统。这种系统每一级都有自己的功能,基本上是独立的,但级与级之间或同级的计算机之间又有一定的联系,相互之间实现通信
5	现场总线控制系统	FCS(Fieldbus Control System)是将现场仪表和控制室仪表连接起来的全数字化、双向、多站的互连通信的控制网络系统。它融合了智能化仪表、计算机网络和开放系统互连(OSI)等技术 现场总线打破了传统的 DCS 的结构模式。传统的 DCS 采用一对一的设备连线,按控制回路分别进行连接,位于现场的测量变送器与位于控制室的控制器之间,控制器与位于现场的执行器之间均为一对一的物理连接。而现场总线由于采用了智能现场设备,能够把原先 DCS 中处于中央控制室的控制模块、输入输出模块内置到现场设备,加上现场设备具有通信能力,现场的测量变送仪表可以与阀门、开关等执行机构直接传送信号,因而控制系统功能能够不依赖控制室的主控计算机或控制仪表而直接在现场完成,实现了彻底的分散控制,使控制实时性和系统可靠性大大提高

续表		
序号	类 型	说 明
6	计算机集成制造系统	<p>计算机集成制造系统（CIMS: Computer Integrated Manufacturing System）是计算机技术、网络技术、自动化技术、信号处理技术、管理技术和系统工程技术等新技术发展的结果，它将企业的生产、经营、管理、计划、产品设计、加工制造、销售及服务等环节和人力、财力、设备等生产要素集成起来，进行统一控制，求得生产活动的最优化。CIMS 一般由集成工程设计系统、集成管理信息系统、生产过程实时信息系统、柔性制造工程系统及数据库、通信网络等组成。随着 CIMS 研究的进一步发展，人们将 CIMS 系统集成思想应用到了流程工业中，获得了良好的设计效果。而流程工业与离散工业特征的区别，使得流程核心技术难题在于生产监控和质量管理等。由于这些差别，有学者提出将流程工业的 CIMS 单独命名为 CIPS（Computer Integrated Process System）</p> <p>CIMS 采用多任务分层体系结构，经过 20 多年的发展，现在已经形成多种方案，如美国国家标准局（AMRF）的自动化制造实验室提出的 5 层递阶控制体系结构，面向集成平台的 CIMS 体系结构，连续型 CIMS 体系结构及局域网型 CIMS 体系结构等。但不管结构如何变化，其基本控制思想都采用递阶控制</p>

5.2 常用数字控制器设计

计算机控制系统设计通常是指在反馈控制系统结构和对象特性确定的情况下，按照给定的系统性能指标，设计出数字控制器的控制规律和相应的数字控制算法，使控制

系统满足性能指标的要求。由于计算机具有强大的计算功能、逻辑判断功能及存储信息量大等特点，因此计算机可以实现模拟控制器难以实现的许多复杂的先进控制策略。计算机控制系统的设计方法也是多种多样的。按照各种设计方法所采用的理论和系统模型的形式，可以大致分为：模拟化设计法（也称连续域—离散化设计法），离散域直接设计法（也称 Z 域设计方法或直接设计法），复杂控制规律设计法，状态空间设计法。这里主要介绍计算机控制系统的一些常用设计方法。

数字控制器的模拟化设计方法，是指在一定条件下把计算机控制系统近似地看成模拟系统，忽略控制回路中所有采样开关和保持器，在 s 域中按连续系统进行初步设计，求出模拟控制器，然后通过某种近似，将模拟控制器离散化为数字控制器，并由计算机实现。由于工程技术人员对连续域设计有丰富经验，因此数字控制器的模拟化设计方法得到了广泛应用。

5.3 计算机控制系统的设计步骤

计算机控制系统的设计受到系统规模、控制对象、控制策略和主机选择等不同而有所差异，但设计的主要内容及大致步骤是雷同的。

在设计之前，先要估价一下引入计算机以后成本的高低，系统性能改善程度、系统的通用性、可靠性和可维修性等方面。再确定是否在系统中引入计算机。通常从船舶的工作环境以及降低工作人员在船舱的劳动强度考虑，引入计算机控制是十分必要的。

计算机控制系统设计的一般步骤，见表 6.1-57。

表 6.1-57 控制系统设计步骤

步骤	项目	说 明
1	确定任务	<p>在进行系统设计之前，必须对控制对象的工作过程进行深入的调查、分析，熟悉其工艺过程，才能根据实际应用中的问题提出具体的要求，确定系统要完成的任务。然后用流程图来描述控制过程和控制任务，写成设计任务说明书，作为整个控制系统设计的依据，才能提出切实可行的系统设计方案</p> <p>确定系统要完成的任务时，对于控制系统，要明确采用开环还是闭环控制。闭环控制还需进一步确定是单闭环还是多闭环控制。控制系统类型是监督计算机控制（SCC）系统、分级控制系统或工业测控网络系统等。还要仔细了解用户的操作要求、控制精度等</p> <p>此外，还必须认真了解未来计算机应用系统的工作环境，包括电源的稳定性、干扰大小以及环境的温度、湿度、盐雾、冲击、振动等船用条件适应性等</p>
2	建模和确定控制方法	<p>确定系统的数学模型、控制策略、控制方法等</p> <p>工业生产中计算机控制系统控制效果的优劣，主要是由控制方法的优劣决定的。在直接数字控制系统中，最常用的是数字 PID 控制方法及其改进形式，此外还有离散域内数字控制器的直接设计方法以及基于系统状态空间描述的控制方法等。系统所用的控制方法和算法，要根据控制对象的不同特性和要求恰当地选择。一般要通过数字仿真（或称计算机仿真），来比较所选择的控制方法的优劣，从而初步确定控制方法</p>
3	总体方案设计	<p>依据设计任务说明书、控制对象的特性和控制策略，开展系统的总体设计</p> <p>首先用“黑箱”设计法——画方块图的方法，做出系统原理结构设计，明确各方块之间的信号的类型、输入输出关系和功能要求，而不需要确定“黑箱”内的具体结构</p> <p>然后选择传感器、变送器和执行机构；可根据被测量的种类、量程及被测对象的介质类型和环境来选择传感器和变送器的具体型号</p> <p>总体方案确认后，要形成文件，建立总体方案文档。系统总体文件包括以下内容</p> <p>(1) 系统的主要功能、技术指标、原理性方框图及文字说明</p> <p>(2) 控制策略和控制算法，例如 PID 控制、大林算法、Smith 补偿控制、前馈控制、模糊控制和最优控制等</p> <p>(3) 系统的硬件结构及配置，主要的软件功能、结构和框图</p> <p>(4) 方案比较和选择</p> <p>(5) 保证性能指标要求的技术措施</p> <p>(6) 抗干扰和可靠性设计</p> <p>(7) 机柜和机箱的结构设计</p> <p>(8) 经费和进度计划的安排</p>

续表

步序	项目	说 明
4	硬件设计	<p>采用总线式工业控制机进行系统的硬件设计,可以解决工业控制中的众多问题。总线式工业控制机高度模块化且具有插板结构,因此,采用组合方式能够大大简化计算机控制系统的设计。采用总线式工业控制机,只需简单更换几块模板,就可以很方便地变成另外一种功能的控制系统</p> <p>(1) 选择系统的总线和主机机型</p> <p>常用的船用控制机内总线有两种,即 PC 总线和 STD 总线。根据需要选择其中一种,一般常选用 PC 总线进行系统的设计</p> <p>根据计算机控制系统的基本类型,如果采用分级控制系统 DCS 等,必然有通信的问题。外总线就是计算机与计算机之间、计算机与智能仪器或智能外设之间进行通信的总线,它包括并行通信总线(IEEE-488)和串行通信总线(RS-232C)。另外还有可以用来进行远距离通信、多站点互联的通信总线 RS-422 和 RS-485。具体选择哪一种,要根据通信的速率、距离、系统拓扑结构、通信协议等要求来综合分析,才能确定</p> <p>在总线式工业控制机中,有许多机型,都因采用不同的 CPU 而不同。以 PC 总线工业控制机为例,其 CPU 有 8086、80286、80386、80486、Pentium(586)等多种型号,内存、硬盘、主频、显示卡、CRT 显示器也有多种规格。选择合适的机型应考虑的因素:根据实际系统对采样速度的要求来考虑主机的档次和具体配置;根据应用场合的不同,选择合适的 IPC 机型号;根据系统对运行速度和精度的要求配置存储器,总之,要根据“经济合理,留有扩充余地”的原则选择合适的 IPC 机</p> <p>(2) 选择输入输出通道模板</p> <p>一个典型的计算机控制系统除了具有主机之外,还必须有各种输入输出通道模板,其中包括数字量 I/O(即 DI/DO)、模拟量 I/O(AI/AO)等模板</p> <p>PC 总线的并行 I/O 接口模板多种多样,通常可分为 TTL 电平的 DI/DO 和带光电隔离的 DI/DO。通常和工业控制机共地装置的接口可以采用 TTL 电平,而其他装置与工业控制机之间则采用光电隔离。对于大容量的 DI/DO 系统,往往选用大容量的 TTL 电平的 DI/DO 板,而将光电隔离及驱动功能安排在工业控制机总线之外的非总线模板上,如继电器模板(包括固态继电器板)等</p> <p>AI/AO 模板包括 A/D、D/A 板及信号调理电路等。AI 模板输入可能是 0~±5V、0~10mA、4~20mA 以及热电偶、热电阻和各种变送器的信号。AO 模板输出可能是 0~5V、1~10V、0~10mA、4~20mA 等信号。选择 AI/AO 模板时必须注意分辨率、转换速度、量程范围等技术指标</p> <p>系统中的输入输出模板可按需要进行组合,不管哪种类型的系统,其模板的选择与组合均由生产过程的输入参数和输出控制通道的种类和数量来确定</p> <p>(3) 选择变送器和执行机构</p> <p>变送器是这样一种仪表,它能将被测变量(如温度、压力、物位、流量、角度、电压、电流等)转换为可远传的统一标准信号(0~10mA、4~20mA 等),且输出信号与被测变量有一定的连续关系。在控制系统中其输出信号被送至工业控制机进行处理、实现数据采集。常用的变送器有温度变送器、压力变送器、液位变送器、差压变送器、流量变送器、各种电量变送器等。系统设计人员可根据被测参数的种类、量程、被测对象的介质类型和环境来选择变送器的具体型号。执行机构是控制系统中必不可少的组成部分,它的作用是接收计算机发出的控制信号,并把它转换成调整机构的动作,使生产过程按预先规定的要求正常运行。执行机构分为气动、电动、液压三种类型。气动执行机构的特点是结构简单、价格低、防火防爆;电动执行机构的特点是体积小、种类多、使用方便;液压执行机构的特点是推力大、精度高。常用的执行机构为气动和电动两种。另外,还有各种有触点和无触点开关,也是执行机构,实现开关动作。电磁阀作为一种开关阀在工业中也得到了广泛应用。在系统中,选择气动调节阀、电动调节器、液动比例阀、伺服阀、电磁阀、有触点和无触点开关之中的哪种,要根据系统的要求来确定。但是要实现连续的、精确的控制目的,必须选用气动或电动调节器,对要求不高的控制系统可选用电磁阀</p>
5	软件设计	<p>一般工业控制机配有实时操作系统或实时监控程序,各种控制、运行软件、组态软件等,可使系统设计者在最短的周期内开发出目标系统软件。当然,并不是所有的工业控制机都能给系统设计带来上述方便,有些工业控制机只能提供硬件设计的方便,而应用软件需自行开发研制。自行开发控制软件时,应首先画出程序总体流程图和各种功能模块流程图,再选择程序设计语言,然后编制程序。程序设计之前一般要先进行资源分配。系统资源包括 ROM、RAM、定时器/计数器、中断源在任务分析时已经分配好了,因此,资源分配的主要工作是 RAM 资源的分配。RAM 资源规划好后,应列出一张 RAM 资源的详细分配清单,以作为编程依据。软件设计一般包括以下几个方面</p> <p>(1) 划分模块</p> <p>对于一个稍具规模的系统来说,常将软件划分为若干个相对独立的功能模块,分给多个软件开发人员同时研制,这样也可以缩短开发周期</p> <p>(2) 确定各模块的详细要求</p> <p>最基本的问题是系统的输入输出问题,按照计算机的被控对象确定哪些设备和器件应该在系统中以什么方式与主机进行信息传递。另外,最大的数据速率、平均速率、误差校验过程、输入输出状态指示、字长、格式要求、时钟及选通脉冲等都是需要具体考虑的问题。另一重要问题是处理要求(或控制要求)。我们必须确定对输入的数据进行怎样的处理及处理的顺序。对过程控制来说,往往工作顺序要求相当苛刻。什么时候发送数据,什么时候接收数据,对于一般硬件设备都需要一定的时序关系,为保证计算机与外部设备同步,通常要用锁存电路和定时选通电路来协调。程序长短及数据量多少都将决定内存容量和缓冲区的大小。这一切都与处理要求密切相关</p> <p>最后一个问题是如何进行出错处理。为此需要事先确定出错误处理方案,详细地列出各种错误图像以及显示错误的方法。出错处理最常用的办法是使系统再启动。概括而言,在规定程序开发前要确定的问题是:输入输出、时间限制、处理要求、精确度、内存容量、出错处理和各程序之间的关系等</p> <p>(3) 确定程序设计方法。</p> <p>一旦系统有关的问题已经确定,就进入程序设计阶段。在程序设计过程中,采用合理的程序设计结构是一个技术关键。程序设计通常采用下面几种技术:模块化设计、自上而下的程序设计、编写代码、差错、测试等</p>

续表

步序	项目	说 明
6	软硬件联调	<p>在硬件系统和软件系统分别进行设计并调试的基础上,将硬件和软件放到同一系统中进行联调。在联调中往往是逐步进行的,逐个硬件模块和软件模块进入系统,使它们通过测试,进入正常工作</p> <p>对于各种标准功能模板,按照说明书检查主要功能,比如主机板(CPU板)上RAM区的读写功能、ROM区的读出功能、复位电路、时钟电路等的正确性。在调试A/D和D/A模板之前,必须准备好信号源、数字电压表、电流表等。对这两种模板首先检查信号的零点和满量程,然后再分挡检查。比如满量程的25%、50%、75%、100%,并且上行和下行来回调试,以便检查线性度是否合乎要求,如有多路开关板,应测试各通路是否正确切换。利用开关量输入和输出程序来检查开关量输入(DI)和开关量输出(DO)模板。测试时可在输入端加开关量信号,检查读入状态的正确性,可在输出端检查(用万用表)输出状态的正确性。</p> <p>联调还包括现场仪表和执行机构,如压力变送器、流量变送器、温度变送器以及电动或气动调节阀等。这些仪表必须在安装之前按说明书要求校验完毕。如果是分级计算机控制系统,还要调试通信功能,验证数据传输的正确性</p> <p>系统控制模块的调试应分为开环和闭环两种情况进行。开环调试是检查它的阶跃响应特性,闭环调试是检查它的反馈控制功能。首先可以通过A/D转换器输入一个阶跃电压,然后使PID控制模块程序按预定的控制周期T循环执行,控制量u经D/A转换器输出模拟电压0~5V(DC)给记录仪,记下它的阶跃响应曲线。在完成PID控制模块开环特性调试的基础上,还必须进行闭环特性调试。分别对其作给定值$r(t)$和外部扰动$f(t)$的阶跃响应实验,改变P、I、D参数以及阶跃输入的幅度,分析被控制量$y(t)$的阶跃响应曲线和PID控制器输出控制量u的记录曲线,判断闭环工作是否符合要求。若不符合要求,则需根据现象仔细分析,重新检查程序,排除在开环调试中没有暴露出来的问题</p>
7	离线仿真——试验室模拟运行	<p>系统的调试与运行分为离线仿真与调试阶段和在线调试与运行阶段。离线仿真与调试阶段一般在实验室进行,在线调试与运行阶段在台架试验现场进行。其中离线仿真和调试阶段是基础,它检查硬件和软件的整体性能,为现场投运做准备,现场投运是对全系统的实际考验与检查。系统调试的内容很丰富,遇到的问题是千变万化的,解决的方法也是多种多样的,并没有统一的模式。离线仿真有以下2种类型:全物理仿真(在模拟环境下的全实物仿真)、半物理仿真(硬件闭路动态试验)。对于纯数据采集系统,一般可做到全物理仿真,而对于控制系统,要做到全物理仿真几乎是不可能的。在系统仿真的基础上,进行长时间的运行考验,并根据船上实际运行环境和船级社规范的要求,进行特殊运行条件的考验</p> <p>离线仿真可由人工输入模拟信号(电压),用仪表(例如万用表、示波器等)对输出进行指示,使系统连续运行。在试验室模拟运行过程中,设计人员必须仔细观察运行过程中的各种状态。对任何不正常情况必须仔细分析其原因。必要时,人为地制造一些干扰,以便观察系统的可靠性,亦可将电源波动,观察系统的适应能力</p>
8	现场调试、试运行	<p>在上述调试过程中,尽管工作很仔细,检查很严格,但仍然没有经受实践的考验。因此,在进行台架试验的调试和运行过程中,电气、液压和机械设计人员要密切配合,在实际运行前制定一系列调试计划、实施方案、安全措施、分工合作细则等。现场调试与运行过程是从小到大、从易到难、从手动到自动、从简单回路到复杂回路逐步过渡。为了做到有把握,在调试前先要进行下列检查</p> <p>检测元件、变送器、显示仪表、调节阀等必须经过校验,保证精确度要求</p> <p>各种接线和管路必须经过检查,保证连接正确,除了极性不得接反以外,对号位置都不能接错</p> <p>检查调节阀能否正常工作。旁路阀及截至阀关闭或打开应保证正确</p> <p>检查系统的干扰情况和接地情况,如果不符合要求,应采取措施</p> <p>对安全防护措施也要检查</p> <p>经过检查并已经安装正确后即可进行系统的投运和参数的整定。投运时应先切入手动,等系统运行接近于给定位时再切入自动,并进行参数的整定。在调试的过程中,往往会出现错综复杂、时隐时现的奇怪现象,一时难以找到问题的根源。此时此刻,设计者们应认真地共同分析,努力寻找问题的根源所在</p>
9	验收或鉴定——系统性能评估	<p>在用户使用半年或更长时间之后,若用户和设计者均对系统的性能感到满意,即可组织验收或鉴定,使设计工作完结。否则,依据需要修改设计,重新开发</p> <p>作为一个计算机控制系统工程项目,在研制过程中应该经过哪些步骤,应该怎样有条不紊地保证研制工作顺利地进行,这是需要认真考虑的。如果步骤不清,或者每一步需要做什么不明确,就有可能引起研制过程中的混乱甚至返工。在设计和试运行过程中,系统的设计开发人员要认真编写大量的文件、资料。例如,研制项目的背景、研制报告、技术报告、使用维修说明书、软件资料、硬件图纸等</p>

6 船舶机械电气控制设备的设计、安装、调试

6.1 船舶机械电气控制设备的设计

船舶机械电气控制设备的设计依据是技术规格书或供货合同,设计工作一般可分为三个阶段进行。

6.1.1 方案设计阶段

- (1) 详细了解生产机械的结构、生产工艺、性能参数、环境条件和操作要求等,进行控制方案的论证、确认。
- (2) 必要的估算和校验、电动机的选型、功率、转速、工作制等。

- (3) 控制设备选型。
- (4) 对较复杂的系统应画出控制框图或原理草图。
- (5) 编制主要设备清单。
- (6) 编写方案设计说明书。
- (7) 进行方案设计评审、形成方案设计评审结论。

6.1.2 技术设计阶段

- (1) 根据方案评审意见修改方案设计内容。
- (2) 绘制比较完整的控制原理图。对所需电气元器件选型。
- (3) 必要的计算,包括静态、动态特性、元器件参数、电器整定值等。

- (4) 进行必要的中间试验。
- (5) 设计控制台、柜的总图和部套图。
- (6) 绘制电气安装图。
- (7) 绘制电控柜、台内部接线图和电控系统外部接线图。
- (8) 编制试验大纲。
- (9) 编制完整的设备订货清单。
- (10) 编制使用说明书。
- (11) 编写技术设计说明书, 并进行技术设计评审。形成技术设计评审报告。

6.1.3 施工设计阶段

- (1) 根据技术设计评审报告修正技术设计内容。
- (2) 绘制完整的施工用控制原理图、控制柜图、系统接线图(电缆连接表)。
- (3) 编制完整的试验大纲、明细表、设计订货清单、使用说明书、履历簿等。
- (4) 编写施工设计说明书、并进行施工设计评审、形成施工设计评审报告。

上述工作内容可根据设备的难易, 复杂程度及产品的历史情况的不同有所侧重, 视情况可将技术设计和施工设计合并进行, 但施工设计阶段应全面完成。每完成一个工作内容应与船舶总体设计相关设计师保持密切联系与配合, 使电气传动与控制性能满足相应船舶机械生产工艺要求, 使传动与控制所需的电源及设备质量、安装布置等要求得到落实, 从而最终完成设计任务。

6.1.4 电气控制系统的电气控制原理图、安装图和控制柜的设计

电气控制原理图、安装图和控制柜的设计是船舶机械电气控制设备设计工作中的重要内容, 设计要领见表 6.1-58。

表 6.1-58 原理图、安装接线图和控制柜设计要领

项目	用途	设计要领
电气控制原理图	原理图是用来说明电气控制系统工作原理的电气电路图, 绘制原理图的出发点是便于阅读	<p>(1) 所有电动机、电器等元件都应采用统一规定的图形符号(GB 4728—1984)和文字符号(GB 7159—1987)来表示</p> <p>(2) 所有的电动机、电器等元件原则上都必须选用船用产品</p> <p>(3) 原理图一般分主电路和辅助(控制)电路两大部分</p> <p>主电路中通过的电流较大, 主电路用粗实线画出。辅助电路包括控制电路、指示电路和照明电路等。辅助电路中的电流较小, 一般用细实线画出。在各导线间有电联系时, 必须在相连导线的交点处画一圆点</p> <p>(4) 在原理图中, 同一电器的不同部分(如线圈、触点)分散在图内不同部位, 为易于识别, 规定使用同一文字符号标明。对于几个同类电器则用不同数字同一文字的符号表示</p> <p>(5) 在原理图中所有的触点均表示“正常状态”, 即没有通电和没有外力作用的状态。如接触器之类是指线圈未通电, 按钮之类是指其未被压合</p> <p>(6) 为安装和维修方便, 电机和电器的各接线端都要用数字编号。主电路的接线端子用字母后面附加一位或两位数字, 如 L11、L21、L31 等。辅助电路的端子只用数字编号。最好是从上到下, 或从左到右按一定规律编号。对直流电源应标明极性</p>

续表

项目	用途	设计要领
电气安装图和外部接线图	安装图是用来表明电气控制系统中各元件(或部件)的实际安装位置和接线情况的, 在安装和检修电气设备时用安装图更为直观方便	<p>(1) 安装接线图应表示出各电器的实际位置, 同一电器的各元件要画在一起</p> <p>(2) 要表示出各电动机、电器之间的电气连接关系</p> <p>(3) 安装接线图中元件的图形和文字符号以及端子的编号应与原理图一致</p> <p>(4) 电控装置中元器件的布置要从有利于工作、安全可靠、操作方便、维修更换元件容易、易于读取和观察、整齐美观等的因素考虑</p> <p>(5) 元器件布置时, 尽可能让整体重心低些, 这有利于耐冲击和振动</p> <p>(6) 外部安装接线图上应标明电缆编号, 电缆型号、电缆芯数、截面积、每根芯线号对应原理图的接点号。对于比较复杂系统而且电缆数量较多、始终端接线号较多时, 可以单独编制电缆连接表, 在电缆连接表中标明电缆编号, 电缆型号、电缆长度, 始终端连接器型号、电缆芯线编号, 对应原理图接点号, 芯线用途等。注意选择电缆时一定要选用船用电缆。电力、控制、电讯电缆要独立选用。截面积和芯数都应适当留有余量</p> <p>(7) 根据需要, 安装接线图上应标明导线的走线管的型号, 规格和尺寸</p>
电气控制柜设计图	控制柜是电控系统电气元件集成的地方, 也是操纵设备和监视设备的主要地方	<p>(1) 电控柜的设计必须确保人身安全、非带电部分的金属构架应可靠接地, 无论在正常使用或故障情况下, 都应保证接地电路的有效性</p> <p>(2) 设计应符合使用方提出的有关规范和各项要求, 满足合同或规格书要求, 包括操作方便可靠, 监视显而易见, 尺寸、重量大小等要求</p> <p>(3) 充分考虑电磁兼容性问题, 许多情况下从电气角度不能解决的电磁兼容问题可以通过电控柜结构, 屏蔽设计加以解决</p> <p>(4) 要注重标准化, 系列化和组合化的设计原则</p> <p>(5) 对重量较重的控制柜、台要设置起吊环</p>

6.2 电气控制设备的安装调试

6.2.1 电气控制设备的检验

电气控制设备的检验有出厂试验检验和型式试验两种。这是考验产品性能的主要手段, 具体应按“试验大纲”或“检验细则”进行。出厂检验原则上都在制造厂进行。型式试验检验是在出厂检验合格后进行。型式试验要由具备船用环境条件检验资格的单位执行, 并在试验完成后出具产品型式试验合格证。个别试验项目可根据制造厂与用户的协商意见在实船上进行。产品出厂前, 用于民船的设备必须通过相关船级社的船检, 并取得相应船检合格证书。

6.2.2 电气控制设备的安装

6.2.2.1 电气控制设备的内部安装

- (1) 元器件的安装。
 - 1) 开关器件和元件应按照制造厂商说明书(使用条件、飞弧距离、隔弧板的移动距离等)等进行安装。
 - 2) 熔断器应安装在便于更换的位置, 在熔断器旁应标明熔断体的电流值。
 - 3) 操作器件应装在操作者易于操作的位置。
 - 4) 监测仪表及报警器件的安装要位置恰当, 便于观察。
- (2) 印制电路板、接插件等在焊接完成后, 不应有脱焊、虚焊、元件松脱或紧固件松脱现象。印制板焊接完成后要用酒精清洗掉焊接面上的助焊剂, 并对非接插部位进行绝

缘处理。

(3) 接线端子和布线。

1) 端子排应视其电压高低、电流大小合理选配,端子排的安装布局应便于接线、接线部位要有一定空间,以保证外接电缆有足够的弯曲半径。

2) 端子排上通常都要预先标好与电控原理图相对应的接线号码。

3) 主回路导线应按电流大小选择船用单芯多股铜线,控制回路导线应选船用多股绞合软铜线。导线最小面积应不小于 1.0mm^2 的软导线。对于电流小于 1A ,电压小于 50V 的电子电路可采用最小截面积为 0.3mm^2 的软导线。

4) 电控箱内部的布线和元器件的布置应使电路之间的耦合干扰最小。控制线(特别是接到敏感器件的信号线)要尽可能远离电源线,以免受到干扰。对于传输低电平信号的控制、报警信号线应采用屏蔽线。

5) 对可移动部位的导线,如跨门的连接线应用多股软铜线,并要有足够的长度,要有保护措施,以防止导线的摩擦损伤。门与箱体之间要有专用接地线相连。

6) 连接发热元件的导线应采用耐高温的导线或在端子引出部位以瓷碗导管替代导线绝缘层。

7) 导线的敷设应整齐美观,除走线槽布线外,应每隔一定距离加以扎紧固定。凡电路原理图或接线图上有电气回路标号者,其连接导线的端部都应标出回路标号(如加号码管),标号应清晰、牢固、完整、不脱色。

6.2.2.2 电气控制设备的实船安装

电气控制设备的实船安装要按照本卷“第10篇船舶电

气工艺”实施。

6.2.3 电气控制设备的调试

6.2.3.1 电气控制设备出厂前的调试

调试前,应充分了解船舶机械的生产工艺,掌握电气传动控制系统的设计原理,性能参数和要求达到的各项指标。熟悉系统中各种元器件及控制单元的性能,同时还应熟悉调试中所使用的各种仪器、仪表设备的性能和使用方法。在此基础上依据已编制的试验大纲制定周密的调试计划,再按计划实施调试。调试步序为一般检查;线路检查;绝缘检查;操作控制电路调试;故障检测元器件动作值的整定;系统调试。

6.2.3.2 电气控制设备的码头(系泊)试验和航行试验

(1) 电气控制设备的码头(系泊)试验是在设备实船安装完成后进行。

(2) 码头试验的步序和设备出厂前的调试类似,重要的是注重外部相关部套件型号、规格、数量的正确性、接线的正确性。

(3) 首先进行电气控制设备的功能恢复,然后单机试验,再后进行整个系统,包括船舶机械的联调试验,完成全套试验并合格后方可向船厂报检验收。

(4) 电气控制设备的航行试验是在完成码头(系泊)试验后进行,步序和码头(系泊)试验相近似,视设备的具体情况有的比较简单的设备就只需做完码头(系泊)试验后就直接交付使用。

(5) 为保证设备和人身的安全,码头(系泊)试验和航行试验都应在造船厂的统一安排下按计划执行。

第2章 船舶甲板机械电气控制

船舶甲板机械主要包括舵机、起货机、锚机、绞缆机、吊艇机、舷梯起落机、舱盖机等。

船舶甲板机械的驱动方式有电动式和电动液压式两大类。其相应的控制回路为电气控制回路和电液控制回路。在电气控制回路中，现有的多数船舶仍采用继电器-接触器控制，随着科学技术的发展现在不少船舶已经把可编程控制器和单片机引入甲板机械控制系统中来，使得控制系统更可靠，操作也更方便。在电液控制回路中，为了提高系统的自动化程度，更多采用电子技术和液压技术结合的电液复合系统，使电动液压控制系统在船舶甲板机械的驱动及控制有了进一步的发展。

1 船舶起货机的电气传动控制

船舶起货机在货船、客货船及大多数工程船上是一种重要的甲板机械，用来吊放货物或工程机械。

1.1 船舶起货机的类型及特点

船用起货机的类型依据拖动方式来分，有电动起货机和电动液压起货机两种。从机械结构形式来分，主要有吊杆式起货机、回转式起货机（克令吊）和行走式起货机（门吊）几种类型。在20世纪60年代到70年代中，船舶起货机多采用吊杆式起货机。20世纪80年代以后，回转式起货机逐渐增多起来，并有不少是采用电动液压型式。近年来，集装箱船的不断发 展，行走式起货机（门吊）逐渐被采用。

电动起货机的优点是便于实现自动化和遥控，并且本身振动、噪声较小。可采用多电机拖动或选用各种类型电动机的固有特性及人为特性来满足起货机对电力拖动要求，设计成紧凑的电力拖动系统。电动起货机的缺点是电气线路较为复杂。

电动液压起货机的优点是调速平滑，能实现无级调速，加速时间短，有良好的制动能力，不需要电磁制动器。由于它的调速和换向是由液力机械完成的，电动机恒速不变，使其控制线路简化。它的缺点是工作效率低、制造精度要求高，油路管道系统复杂。

1.2 电动起货机的结构和运行特性

电动起货机主要由以下三个部分构成：电动机、减速箱和离合器组成的传动机构，卷筒、电磁或机械刹车装置与吊杆。

1.2.1 吊杆式起货机

吊杆式起货机有单杆式和双杆式两种。单杆式电动起货机是一种具有电动回转和变幅的起货机，见图6.2-1。

图中有三台电动绞车：图中“1”是货物升降的绞车；“2”是吊杆升降变幅绞车，“3”是吊杆回转绞车。有两个主令控制器：一个主令控制器用来提升和落货；另一个主令控制器有特殊的结构，将变幅与回转控制合在一个手柄上操作。

双杆式电动起货机是使用两台起货机，在起货过程中，相互配合进行工作，见图6.2-2。

在运行时，吊杆不转动，货物水平移动，靠两台起货绞车同时协调工作来完成。双杆吊货的工作过程见图6.2-3。

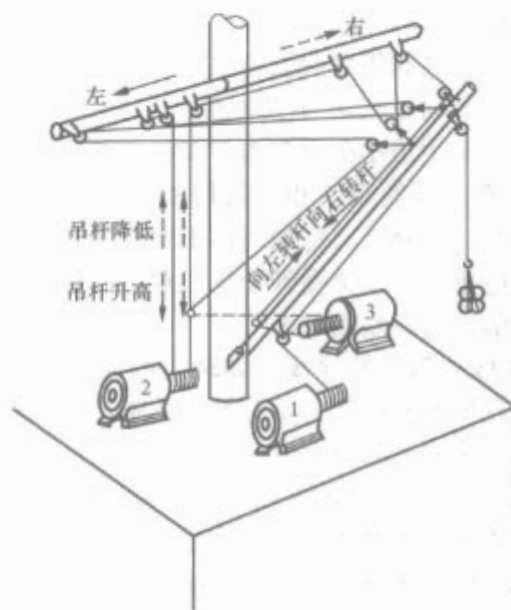


图 6.2-1 单杆式电动起货机结构图

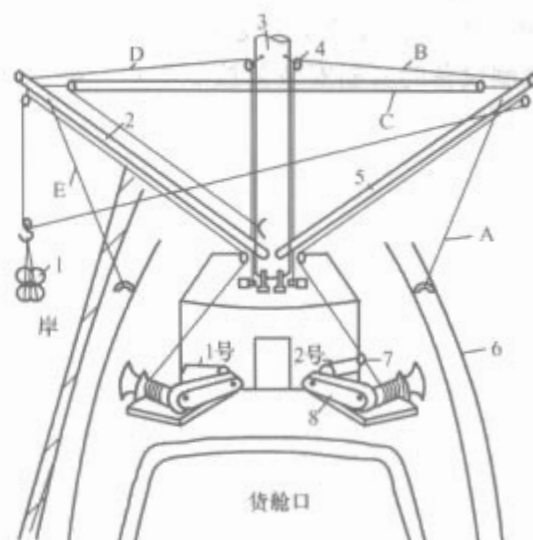


图 6.2-2 双杆式电动起货机结构图

图中横坐标表示时间 t ，纵坐标表示电动机负载力矩 M_t （此图中横坐标以上为电动状态，横坐标以下为制动状态）。

各段时间动作情况如下：

- (1) 在 t_1 时间内是吊货阶段。
 - (2) 在 t_2 时间内，货物由舷外向舱口移动。
 - (3) 在 t_3 时间内，是落货阶段。
 - (4) t_4 是卸货时间。
 - (5) t_5 为收索时间。当钩与货物脱开，电动机又开始电动收索。
 - (6) 在 t_6 时间内，钩钩从舱口移至舷外，当钩钩提升到高于舱口时，1号起货机继续电动收索，而2号起货机为电动松索。
 - (7) 在 t_7 时间内是放下钩阶段。
 - (8) t_8 为装货时间，此时两台电动机都停止工作。
- 以后的工作过程重复上述过程。

由图6.2-3可见，起货电动机是重复短期工作，即周期性有规律地运转，所以起货电动机一般采用专用的重复短期

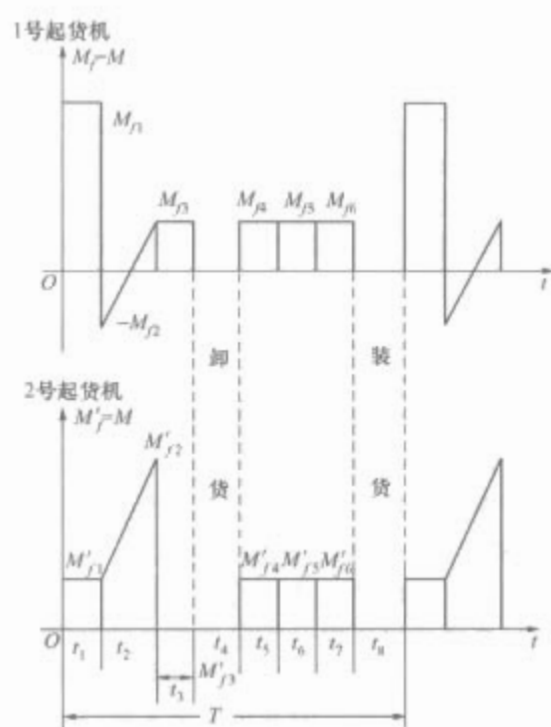


图 6.2-3 双杆吊货时电动机负载图

制。这种工作制用持续率 FC 值表示，见式 (6.2-1)。

$$FC = \frac{t_R}{t_R + t_1} \times 100\% = \frac{t_R}{T} \times 100\% \quad (6.2-1)$$

式中： t_R 为一周期内工作时间，min； t_1 为一周期内的停止时间，min。

船舶起货机采用的电动机的持续率一般为 15%，20%，25%，40%。一个周期的时间一般不超过 10min。

起货机电机的起动和制动次数甚多，起动和制动时电流很大，将引起电动机发热，同时也影响电器的使用寿命。因此，对起货电动机的接通次数也要加以限制。如国产变极 (4/18/28) 变速电动起货机的接通次数为 240/480/480 次/h。允许接通次数比持续率指标更重要。

1.2.2 回转式电动起货机 (克令吊)

回转式起货机 (克令吊) 包括提升、变幅和回转三个主要机构，回转式起货机结构示意图见图 6.2-4，图中“1”是提升机构电动机，“2”是变幅机构电动机，“3”是旋转机构电动机。

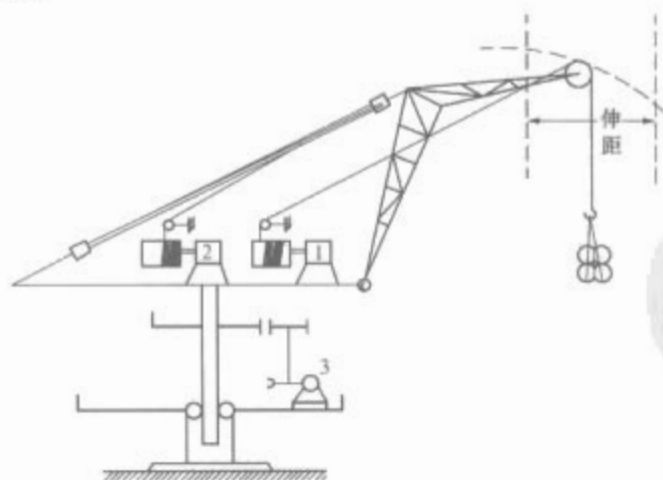


图 6.2-4 克令吊结构示意图

回转式起货机的吊货过程可以用简化的负载图来表示，如图 6.2-5 所示。图中纵坐标 M_f 、 M'_f 、 M''_f 分别为提升机构、回转机构和变幅机构电动机轴上的负载力矩，横坐标为时间 t 。工作过程如下：

- (1) t_1 时间为吊起货物阶段，同时伸距由最大到最小。
- (2) t_2 时间为继续吊货至需要高度，同时开始回转 (回转机构起动时，伸距必须最小)。

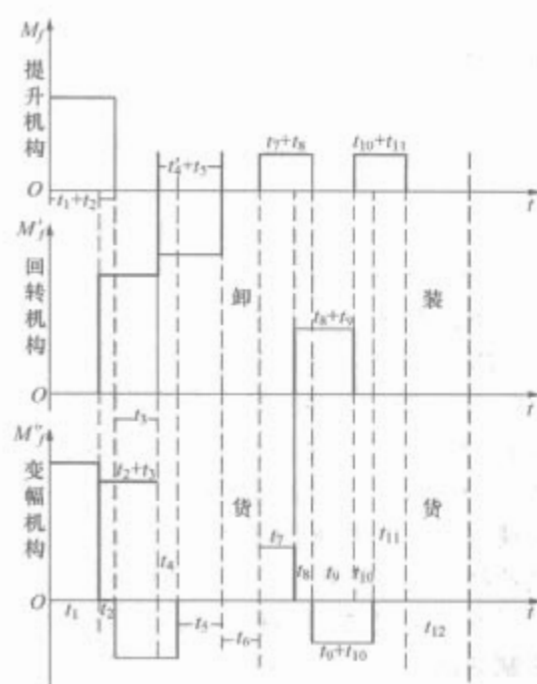


图 6.2-5 各电动机轴上所受的简化负载图

(3) t_3 时间回转至需要位置，同时伸距由最小开始变大。

(4) t_4 时间伸距继续变化至最大，同时开始落货。

(5) t_5 时间继续落货直至“到位”。

(6) t_6 时间卸货 (摘钩)，此时各电动机停止工作。

(7) t_7 时间空钩吊上，同时伸距由最大到最小。

(8) t_8 时间继续吊至需要高度，同时开始回转。

(9) t_9 时间继续回转至需要位置，同时伸距由最小开始变大。

(10) t_{10} 时间伸距继续变化至最大，同时开始落空钩。

(11) t_{11} 时间继续落空钩，直至“到位”。

(12) t_{12} 时间为装货，各电动机停止工作。

(1) 至 (12) 为一个工作周期，以后重复上述过程。

1.2.3 船舶起货机电力拖动及控制的基本要求

1) 由于起货机负载变化的幅度很大，在紧急情况下，也需要将重物吊起，因此要求电动机的过载性能好，起动力矩足够大。而且电动机要具有较软的机械特性，以适应轻载快速运行，重载慢速运行。

2) 为了提高生产效率和保证安全的着地速度，必须要求有较大的调速范围，通常要求在 7~10 范围内。

3) 为了缩短起动和制动时间，减小能量损耗，提高效率，要求选用电动机转子惯量 (GD^2) 尽量小的电动机。

4) 应有完善的保护环节，除短路、失电压、过载、缺相等一般保护环节外，还应有防止重载高速提升和超速下落的保护环节，通风和与起货电动机之间的连锁环节 (风门未打开，风机不能起动，起货电动机也无法起动) 以及交流变极电动起货机在手柄换挡过程中，电动机至少应保持有一副绕组通电，防止重物自由跌落的环节。此外，还必须设置发生故障时紧急停车或强行将重物低速放下等应急按钮，以防止事故扩大或造成严重货损。

1.3 交流电动起货机控制线路

变极调速电动起货机分为恒功率和恒转矩调速两种方式。其电气部分主要由电动机、控制箱和主令控制器组成。

1.3.1 恒功率交流变极调速起货机控制系统

图 6.2-6 是国产 HJD 型交流变极调速起货机控制电路原理图。通过改变齿轮箱传动比，可以获得 1.5t、3t 和 5t 三种起重量，其对应的额定起货速度为 35m/min、30m/min

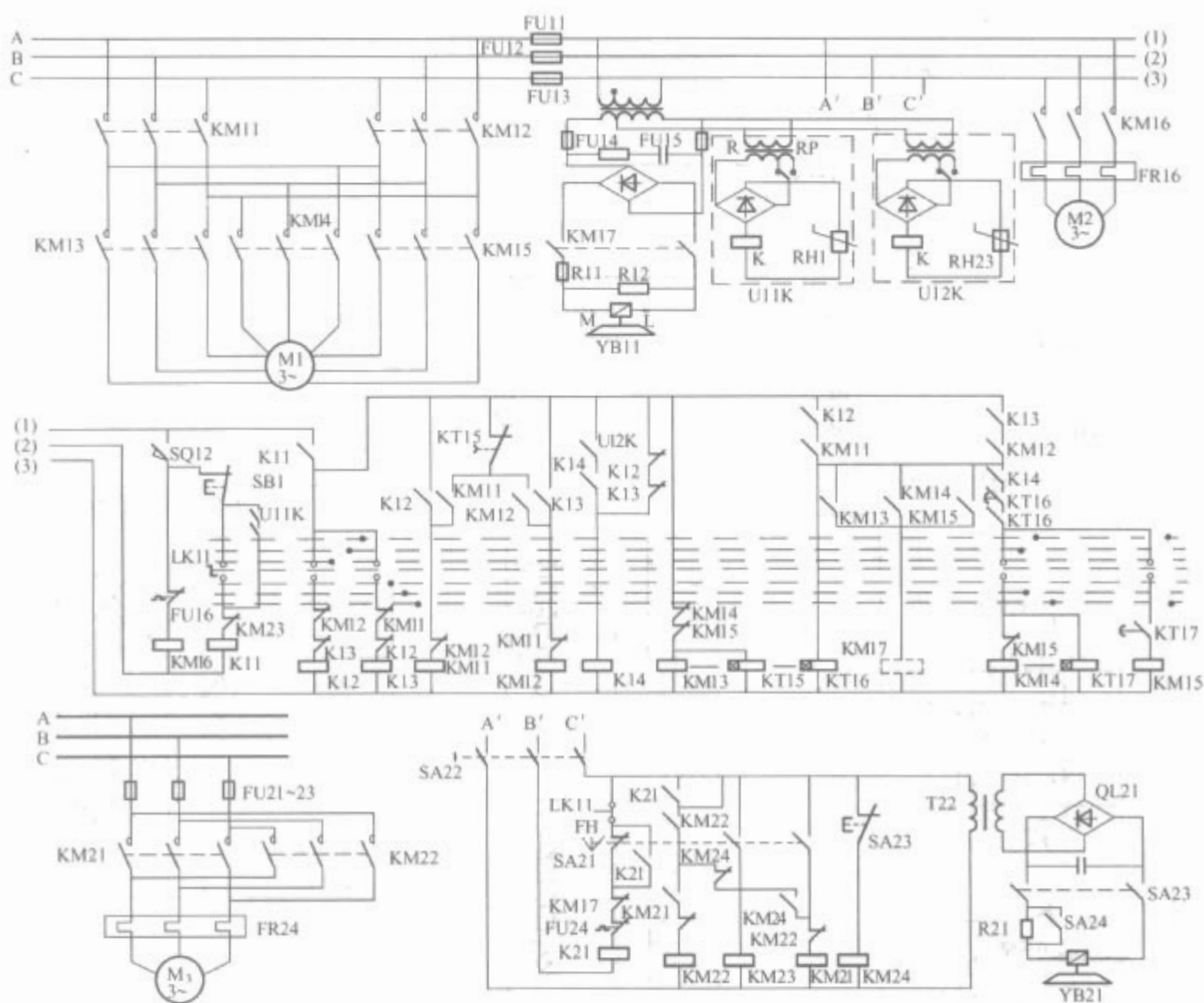


图 6.2-7 恒转矩交流三速起货机控制系统原理图

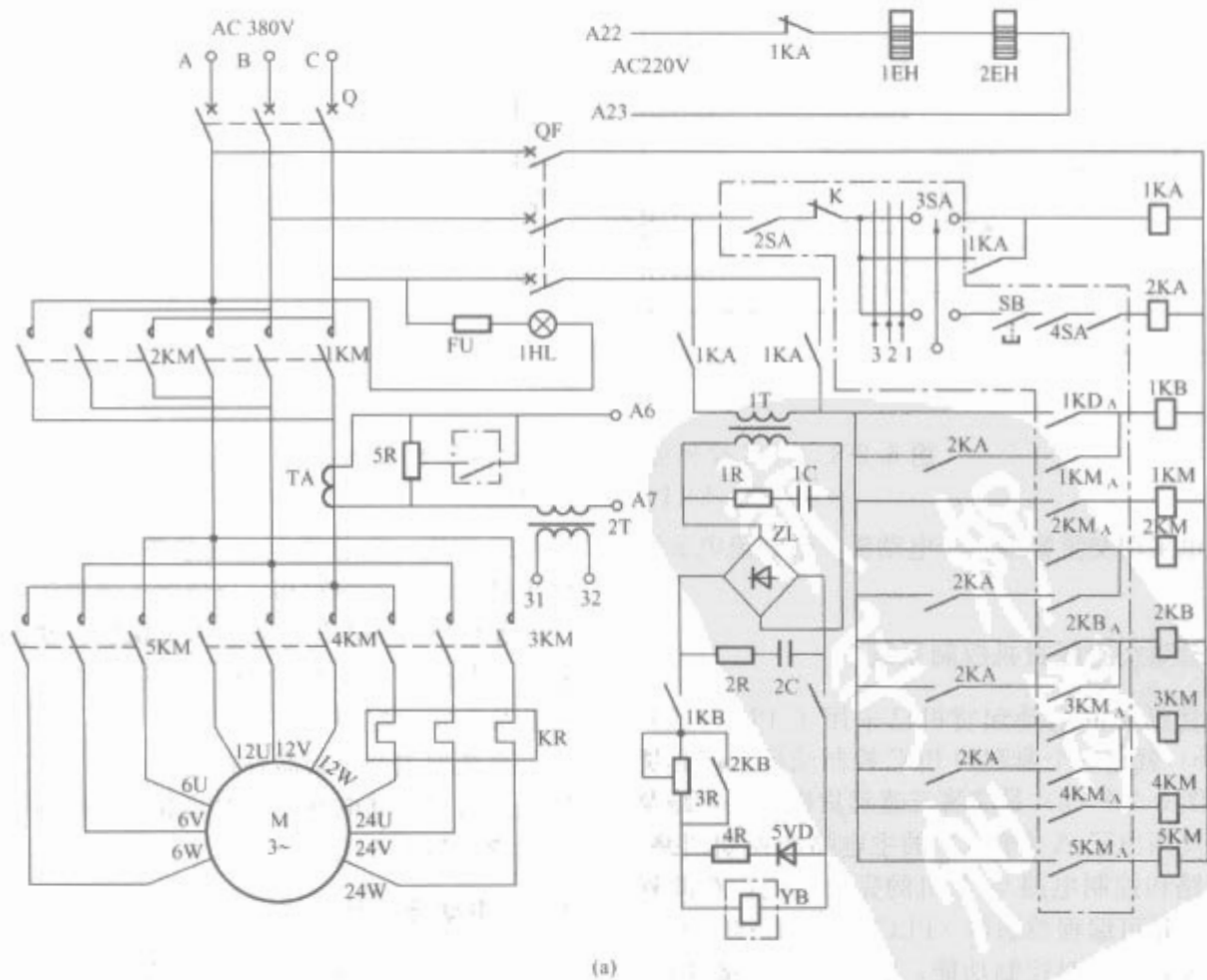


图 6.2-8 PLC 控制交流三速起货机控制电路 (一)
(a) 原理图

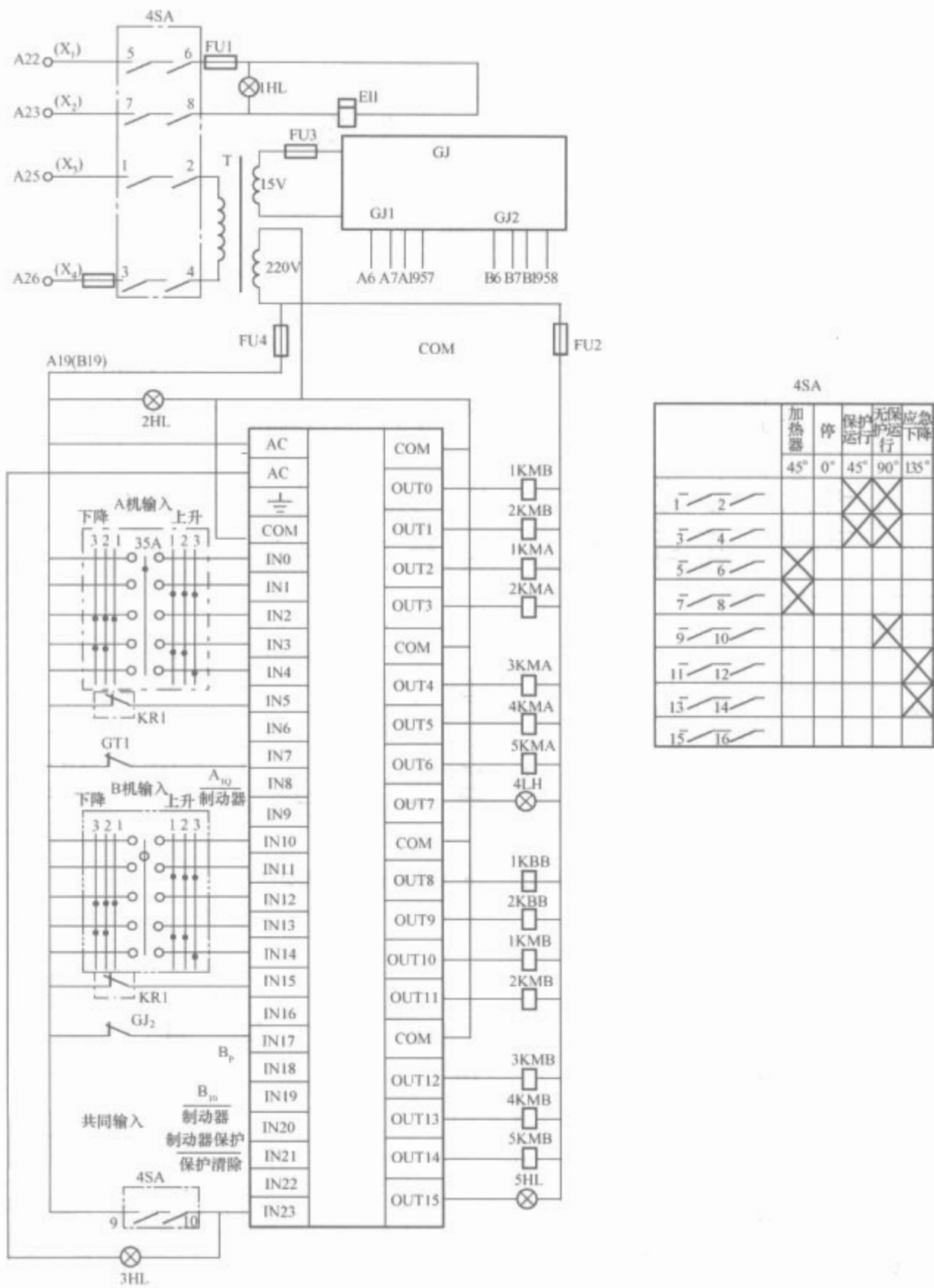


图 6.2-8 PLC 控制交流三速起货机控制电路 (二)
(b) PLC 外部接线图

吊杆电动机也采用交流笼型异步电动机，带直流电磁制动器。

1.4 PLC 控制三速交流起货机控制系统

近年来许多货船上的电动起货机已采用了 PLC 控制，图 6.2-8 (a)、(b) 就是一个典型的 PLC 控制交流三速起货机电气原理图。图 6.2-8 (a) 是交流三速起货机的主电路及控制电路。图中只画出了 A (单机) 的主电路和控制回路，由于 B 机的主电路和控制电路与 A 机的完全相同，在此省略。图 6.2-8 (b) 是可编程控制器 (PLC) 的外部接线图。

这个控制系统具有实时控制功能，它能实现直接加速，延时加速，直接制动、三级制动，逆转矩换向，机械刹车滞后打开，主令越位保护，快速重复起动，主令信号确任。具

有应急功能：应急停车，应急落货 (PLC 故障时) 由零压继电器完成应急落货和应急情况下强迫运行。

系统具有的保护功能：零位保护、缺相保护、失电压保护、过载保护，操作过频保护。还能进行工作持续率自动计算和故障自动报警。

系统把主令控制器各挡触点作为 PLC 的输入，PLC 的输出送给中间继电器，由中间继电器控制主回路接触器，完成起货、落货等功能。

1.5 电动液压起货机

电动液压起货机与电动起货机相比其优点是：驱动平稳、能吸收冲击负荷，加速度快，调速范围宽且可无级调速，对船舶电站冲击小。大功率的起货机大都以电动液压起

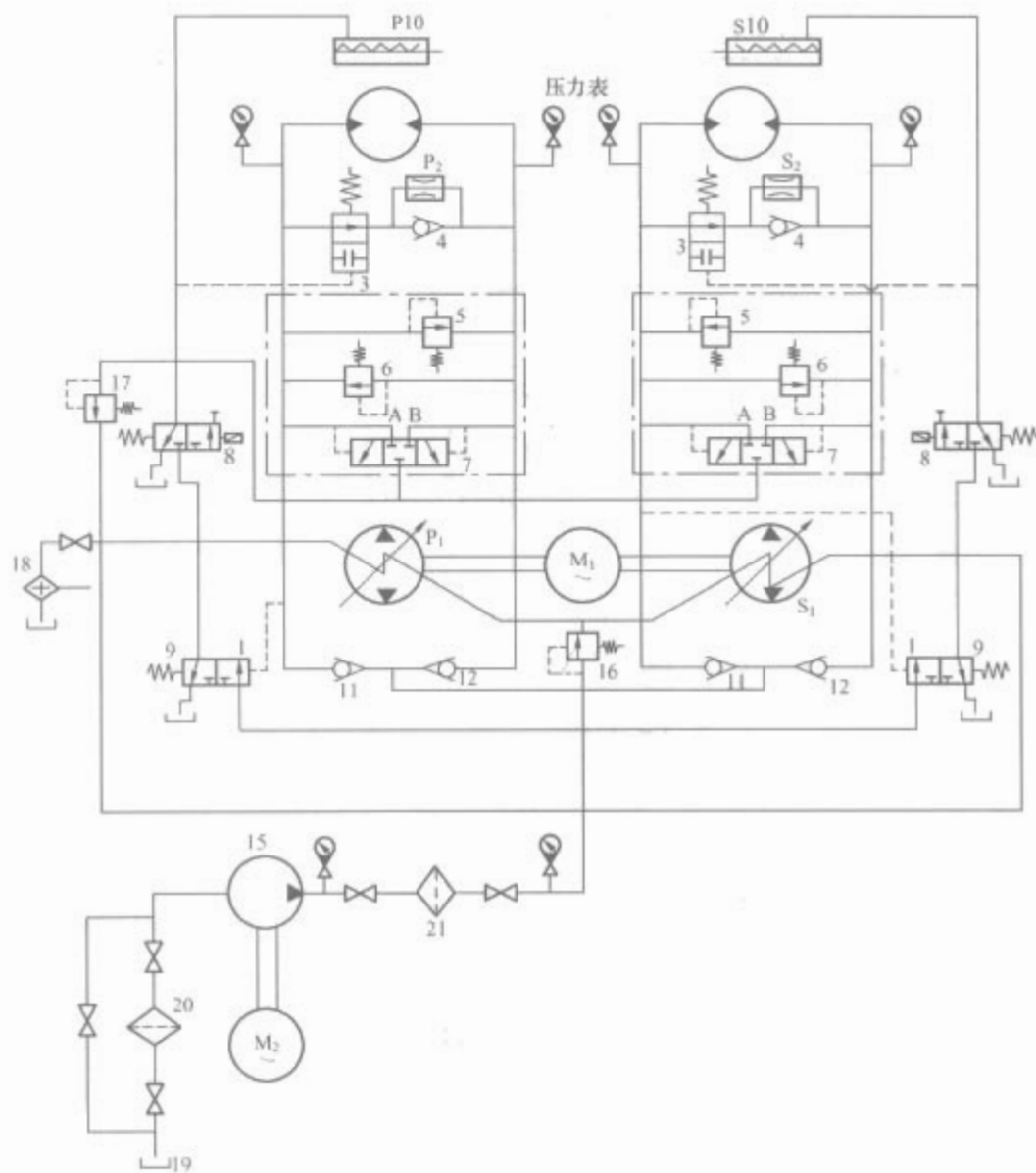


图 6.2-9 电动液压起货机液压系统原理图

货机为主。如南京绿洲机器厂生产的高压 (21MPa) 电动液压起货机和武汉船用机械厂生产的中低压 (7MPa、17.5MPa) 电动液压起货机。

由于电动液压起货机控制系统的调速、制动、提升和落货等都是利用液压系统来实现的,电动机恒速运转,不要求调速。船舶上大多采用笼型异步电动机来拖动主、辅油泵,其电气控制相对较简单。图 6.2-9 是国产电动液压起货机液压系统原理图。图 6.2-10 是电动液压起货机电气控制系统原理图。该系统用于双杆起货机,左、右杆的卷筒驱动系统完全对称。图中主油泵电动机 M1 容量较大 (100kW), 为了避免启动电流对电网有过大的冲击,故采用 Y- Δ 降压启动。零位开关 1LW0、2LW0 的作用非常重要,当主令控制器手柄在零位时,液压制动器刹车,主令手柄离开零位时,油刹车松闸,只有保证主令手柄在零位时,才能启动主油泵电动机,这就保证了起货机更安全可靠。

2 船舶锚机、绞缆机电气传动控制

2.1 起锚系统机械的类型及运行特点

2.1.1 起锚系统机械的类型

起锚系统机械是任何船舶都必须配备的重要甲板机械,主要用做船舶安全停泊于水面、系泊于码头或浮筒。起锚系统机械的类型根据船舶类型及布置有多种多样,通常锚机和系统缆机组合一体,设于船艏,用来进行起锚、抛锚和系统。在船艏则装有专用的系统缆机,某些船还装有后锚机。最常用的型式有:卧式起锚机(带系统缆滚筒)、立式锚机(又称起

锚系统缆绞盘)、立式系统缆绞盘及卧式绞缆机等。卧式锚机(带系统缆滚筒)即能起双锚又能系统,但其全部设备均在甲板上,占地面积大。有的船舶则在船艏设置立式锚机(起锚系统缆绞盘),它占地少,目标小,但只能起单锚和系统。大多数起锚系统机械为电力拖动,现代大型船舶及工程船舶由于其功率较大,因此采用液压传动系统,即电动液压锚机和绞缆机。

一般船舶用的锚机均采用锚链作为锚的系索,由于锚链非常笨重粗大,它不可能缠绕于滚筒上,而是通过锚链轮的传动,从专门的锚链舱中进出,这类锚机称为航行锚机。而用于某些工程船舶的锚机(如打捞船、救生船的定锚机,海洋调查船的深水锚机,疏浚船的移船锚机等)由于需用锚链特别长,重量和体积之庞大已不允许采用锚链而改用钢缆,故采用卧式绞缆起锚机。

2.1.2 起锚系统机械的运行特点

当船舶在水面上锚泊时,必须将锚及锚链抛出,使锚爪抓入水底泥土中将船舶固定住。如锚泊处的水深不大,则可松开锚机的制动器,依靠锚及锚链的自重进行重力抛锚(即进行自由落体抛锚),这种抛锚方式速度较快,采用锚机上的手动带式制动器来控制抛锚速度(或采用电液控制制动器)。当海水较深(水深大于 50m)或深水锚机,由于钢缆不宜频繁承受手动制动器制动力的冲击,手动制动器难以控制平稳抛出,故采用电动抛锚,此时电动机处于再生制动状态运行,以获得稳定的抛锚速度。定位锚机和移船锚机由于数量多至 4~6 台,每台钢缆方向有所规定,所以抛锚一般由抛锚工作艇将锚带出几百米远处抛下。

航行锚机起锚时,锚机必须有足够的力矩克服风浪、水流及锚链的阻力,方能收进锚链。深水锚机的起锚过程与航行起锚过程基本相同。锚机在运行中有正常起锚和应急起锚两种工作情况。正常起锚过程如图 6.2-11 所示。船舶对锚机有一定的技术要求,如抛两只锚的情况,当起锚时要求双锚依次破土后在一定深度(规范规定 80m)处锚机应能同时收起双锚。起锚过程中电动机的典型负载见图 6.2-12。

当水深大于锚链长度时,则锚抛不到海底,锚机应能将悬垂于水中的锚及锚链收起,它的工作是繁重的,这种情况的起锚称为应急起锚状态。

正常起锚整个过程按拉力的变化特性可分为五个阶段:

(1) 第一阶段。收起躺在海底的锚链。锚机以全速收起躺在海底的一段锚链,此时认为锚链悬垂部分的形状不变,只作平行移动。船舶在锚机收链的拉力 F_1 的作用下慢慢接近抛锚点,此时锚机轴上的负载转矩 F_1 是不变的,如图 6.2-11 的第 I 阶段所示。

(2) 第二阶段。收紧锚链。此时锚爪紧紧抓住锚地泥土或石头,锚机将锚链拉紧,船在此力的作用下前进,负载转矩逐渐增加,转速下降,拉力由 F_1 增至 F_2 ,如图 6.2-11 的第 II 阶段所示。

(3) 第三阶段。拔锚出土。在锚链拉紧后开始拔锚出土,这时电动机的负载转矩突然增大。若电动机的拉力尚不

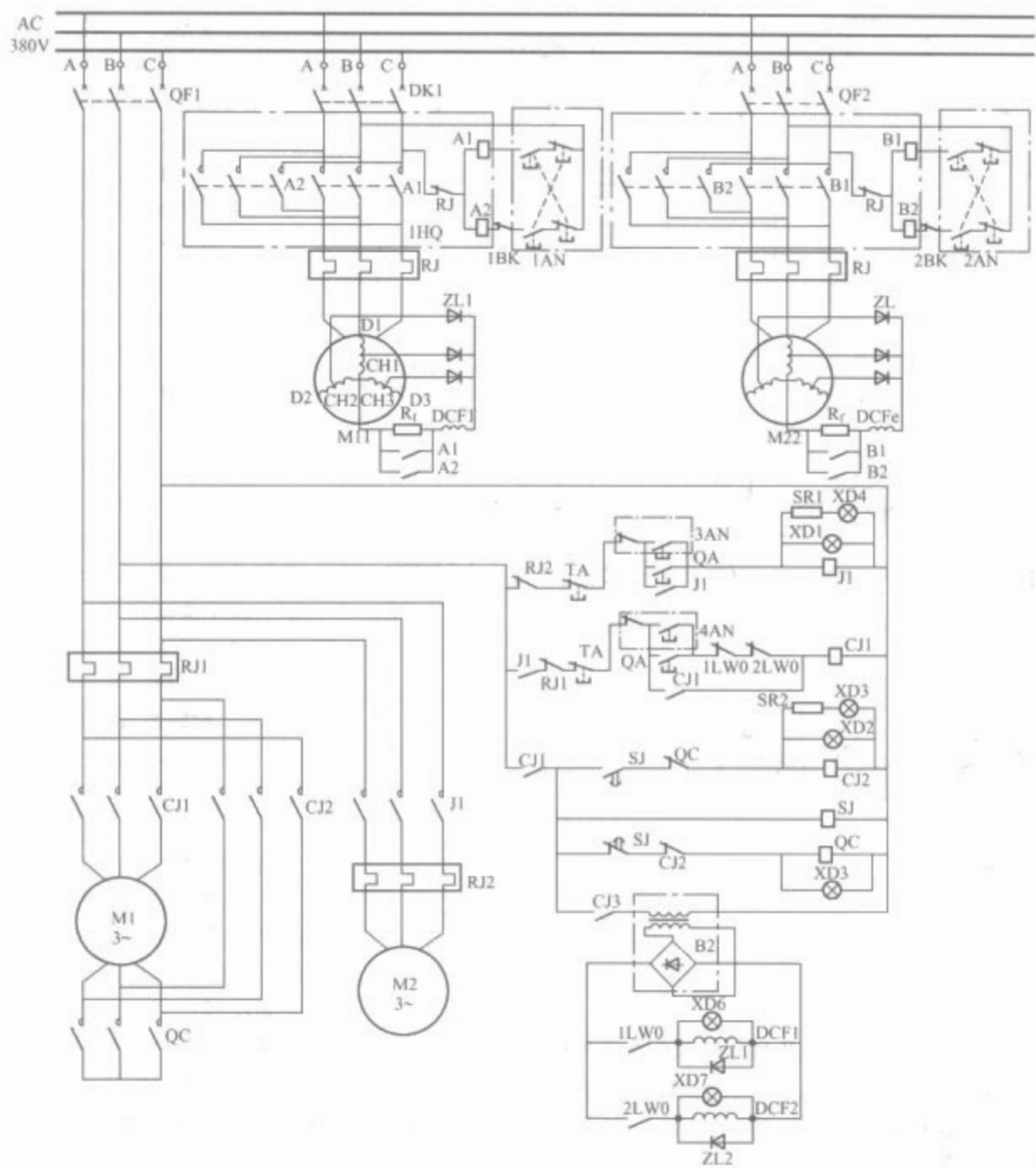


图 6.2-10 电动液压起货机电气控制系统原理图

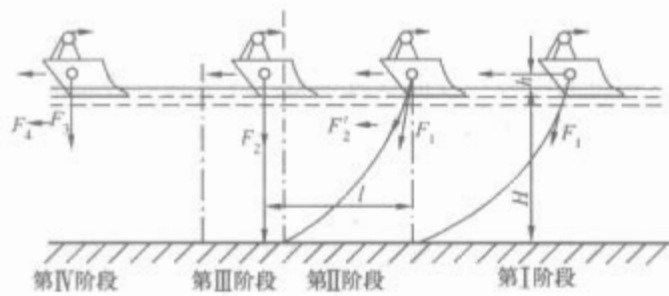


图 6.2-11 正常起锚过程示意及作用力分析图

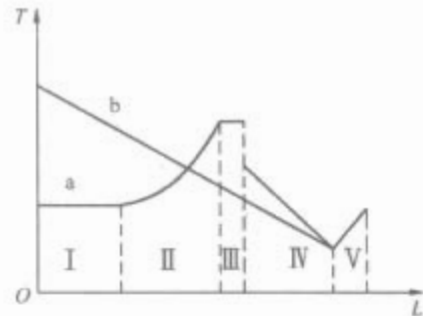


图 6.2-12 典型的起锚阻力矩曲线
a—正常起锚；b—应急起锚

能使锚出土，电动机便进入堵转状态，为防止电动机因较大的堵转电流而烧坏，要求锚机电动机的堵转力矩为额定力矩的两倍，并能承受一定的堵转时间。此时可以靠开动主机，

借助主机推动船舶前进来破土起锚，如图 6.2-11 中的第Ⅲ阶段所示。

(4) 第四阶段：收起悬于水中的锚及锚链。锚出土后，电动机的负载力矩突然降低，随着锚链长度不断缩短，拉力逐渐减小，电动机的负载力矩逐渐下降，如图 6.2-11 中的第Ⅳ阶段所示。

(5) 第五阶段：将锚拉入锚链孔中。锚出水面后电动机应以很低的速度将锚拉入锚链孔，称为收锚入孔，并紧固于锚孔中。这时由于锚与锚链孔之间的摩擦，电动机的负载力矩有所增大。定位锚机和移船锚机也由抛锚工作艇起锚，一般用该艇的主机推力来起锚。

应急起锚：

锚机一般都具有系统滚筒，供系泊时带缆绳之用，即与绞缆机的作用相同。绞缆机操作方便，但系统时的受力情况相对比较复杂。开始系统时受力较大，因为它要克服船舶的惯性，在船舶移动后，拉力就逐渐变小。移船锚机操作移船时，由于阻力是稳定的、距离大、时间长、所以电动机的负荷也是相对稳定的。现代大型船舶在码头系泊时，由于风向、风力、流速、潮汐和船舶吃水的变化，船与码头的相对位置与相对高度时刻在变化，这势必引起系泊缆绳的张力变化较大。为了防止缆绳绷断，必须随时进行调节。因此，现在有些船舶安装带有张力检测的自动绞缆机，它能自动保

持缆绳张力恒定,避免发生事故,保护船舶安全,防止码头被撞坏。

2.2 锚机绞缆机电力拖动控制系统的基本要求

各类船舶的锚机和绞缆机,其拖动控制系统是基本相同的,不论是电动还是液压动力的锚机和绞缆机,它们的技术要求也基本相同。其技术要求归结为以下几点:

(1) 在锚机和绞缆机的控制系统中应设置自动逐级延时起动电路和应急保护电路。

(2) 电动机应具有足够大的过载能力,应能满足任何一种起锚状态所需要的最大转矩,并且能在最大负载力矩下起动。

(3) 电动机在堵转情况下承受的堵转电流时间为1min(堵转力矩为额定力矩的2倍)。

(4) 为满足必须的起锚速度和拉锚入孔时的低速,要求电动机有一定的调速范围,一般要求在5:1~3:1。

(5) 在电动抛锚时,由于是位能性负载,所以要求控制系统必须具有稳定的制动抛锚和匀速抛锚的功能。

(6) 电动机起动次数不宜过于频繁,应能连续工作30min,且要满足30min内起动25次的要求。

(7) 采用电气和机械联合制动,以便满足快速停车。对系统状态,最好还要具有轻载高速性能。

(8) 电力拖动装置应能满足在给定航区内,单锚破土后,能收起双锚。

(9) 对电动液压锚机来讲,它应具有独立的电动机驱动,其液压管路应不受其他甲板机械管路的影响。链轮与驱动轴之间应装有离合器,离合器应有可靠的锁紧装置;链轮或卷筒应装有可靠的制动器,制动器刹紧后应能承受锚链断裂负荷45%的静拉力;锚链必须装设有效的止链器。

2.3 船舶起锚系统机械电动机容量的计算

2.3.1 阻力计算

(1) 正常起锚。按图6.2-11所示的起锚过程可分别计算出起锚过程中各个阶段的阻力。

1) 第Ⅰ阶段(收起躺在水底的余链)。假定在收起余链的过程中,悬链着的锚链形状不变,则锚链的水平分力为船舶所受风力与水流阻力之和平衡,所以锚链拉力 F_1 不变, F_1 的计算见式(6.2-2)

$$F_1 = F + \rho(0.87H + h) \quad (6.2-2)$$

式中: F 为船舶所受水流阻力与风阻力之和(由舾装专业提供数据)N; ρ 为每米锚链的重量,N/m; H 为规定的正常抛锚深度,m; h 为锚链孔中心至水面的高度,m;0.87为考虑海水浮力的系数。

2) 第Ⅱ阶段(改变悬链线形状)。随着悬链线形状的改变,上述力的平衡关系被改变了,而且锚链拉力一直在变大,直至锚破土为止,可以认为其拉力随锚链长度减小而增加。

锚链长度从起始悬链线长度 l 至被拉直时的减小值 l_2 ,见式(6.2-3)

$$l_2 = l - (H + h) = \sqrt{\frac{2.3HF}{\rho} + (H + h)^2} - (H + h) \quad (6.2-3)$$

3) 第Ⅲ阶段(锚破土)。锚破土时拉力受很多因素影响,无法精确计算得出,主要为船舶移动惯性力。但为了充分利用电动机,按电动机可能条件,一般习惯取最大负载为锚重的两倍。这可能出现两种情况,一种是比较容易破土,

电动机在该力矩下就能使锚破土,这阶段中电动机一直在运转;另一种情况则相反,电动机在该力矩下不能使锚破土,而过渡到堵转特性,后在船舶惯性力的作用下才破土,这阶段电动机处于堵转中。

按第一种情况的锚链拉力 F_2 的计算见式(6.2-4)

$$F_2 = 2G + 0.87(G + \rho H) + \rho H \quad (6.2-4)$$

式中: G 为锚重,N。

4) 第Ⅳ阶段(收锚出水)。随着锚链长度减小,拉力成正比减小。

开始时的拉力 F_3 计算见式(6.2-5)

$$F_3 = F_2 - 2G = 0.87(G + \rho H) + \rho h \quad (6.2-5)$$

结束时的拉力 F_4 (锚链孔旁)计算见式(6.2-6)

$$F_4 = G \quad (6.2-6)$$

因此,正常起锚阻力变化见图6.2-13。

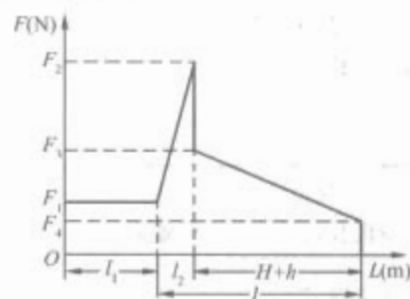


图 6.2-13 正常起锚阻力曲线

5) 起双锚。按规范规定,起双锚是从水下45m处开始,此时锚链拉力 F_{45} 计算见式(6.2-7)

$$F_{45} = 1.74(G + 45\rho) + 2\rho h \quad (6.2-7)$$

(2) 应急起锚。显然,这种起锚状态类似正常起锚Ⅳ阶段,只是锚链长度不同而已。

开始时的拉力 F'_1 (N)的计算见式(6.2-8)

$$F'_1 = 0.87[G + (L - h)\rho] + \rho h \quad (6.2-8)$$

式中: L 为锚链抛出的总长度,m。

结束时的拉力 F'_2 (N)(锚链孔旁)计算值见式(6.2-9)

$$F'_2 = G \quad (6.2-9)$$

应急起锚阻力变化见图6.2-14。

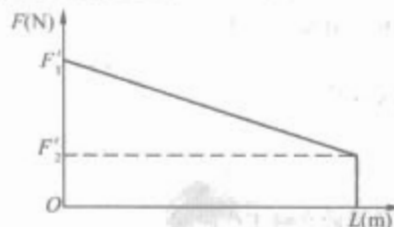


图 6.2-14 应急起锚阻力曲线

(3) 系统。系统拉力与船舶运动方向所受到的水流阻力和风阻力以及运动速度等因素有关,阻力计算式不可能精确考虑多种情况,所以一般根据经验按船舶大小配置合适的系统机械。系统机械的额定拉力应能使船舶移动,系统速度与船舶移动速度一致,使系统索处于始终张紧的状态,达到平稳工作的效果。

2.3.2 容量计算

(1) 计算前需要的原始数据:

锚重	G , 单位: N;
工作锚数	N ;
锚链可抛总长度	L , 单位: m;
每米锚链重量	ρ , 单位: N/m;
锚机链轮直径	D , 单位: m;
平均起锚速度	V_a , 单位: m/s;

抛锚深度 H , 单位: m;
系缆速度 V_m , 单位: m/s;
锚链孔效率 η_1 ;
锚机传动比 K ;
机械传动效率 η_2 ;
系缆传动化 K_2 ;
系缆滚筒直径 D_2 , 单位: m;
起锚最低速度 V_{\min} , 单位: m/s;
水面到锚链孔高度 h , 单位: m;
系缆额定拉力 F_m , 单位: N;
起锚时船舶最大风阻力与水流阻力之和 F , 单位: N。

(2) 计算方法。按计算要求可归纳成下列几个内容:

- 1) 电动机轴静阻力矩计算。
- 2) 按过载能力选择电动机。
- 3) 各阶段工作时间计算。
- 4) 简易负载图的绘制。

5) 电动机发热校验。由于起锚有两种状态, 所以过载能力应按最大阻力矩的状态选择, 但发热校验两种状态均需进行。由于一般规定堵转矩为额定转矩的两倍, 而过载能力一般超过两倍, 所以在锚破土的瞬间, 电动机均工作在堵转特性上。


在计算中很难区分出额定或非额定工作制速度挡, 因它与操作情况有关系, 例如有的认为锚破土时是在低速挡进行的, 所以计算中可不列入 Td_1 (破土非额定情况) 和 t_3 的内容, 但实际上双速的高速与三速的中速还是允许堵转的, 只是时间仅为 0.5min。在起锚过程中实际上也难以准确掌握破土时刻而变换挡次。因此, 建议以最严重情况即全部作为额定工作制的负荷来计算。但在具体选择电动机容量时, 可考虑到这些因素, 当在校验时稍为超出一些时, 可以认为合格。

船舶起锚系统机械电动机容量计算公式见表 6.2-1, 其中阻力 $F_1 \sim F_4$ 为式(6.2-2)、式(6.2-4)~式(6.2-9)的数据。

表 6.2-1 船舶起锚系统机械电动机容量计算公式

序号	计算值名称	公 式	备 注
1	第一阶段收余链的电动机轴阻力矩	$T_1 = \frac{F_1 D}{2k\eta_1 \eta_2} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$	
2	第二阶段锚破土的电动机轴阻力矩	$T_2 = \frac{F_2 D}{2k\eta_1 \eta_2} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$	
3	第三阶段锚出土后的电动机轴阻力矩	$T_3 = \frac{F_3 D}{2k\eta_1 \eta_2} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$	
4	第四阶段终止时电动机轴阻力矩	$T_4 = \frac{F_4 D}{2k\eta_1 \eta_2} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$	
5	应急起锚的电动机轴阻力矩	$T'_1 = \frac{F'_1 D}{2k\eta_1 \eta_2} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$	
6	在 45m 深处起双锚的电动机轴阻力矩	$T_{45} = \frac{F_{45} D}{2k\eta_1 \eta_2} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$	
7	电动机轴最大阻力矩	T_{\max} 在 T_2 , T'_1 及 T_{45} 中选出	
8	电动机计算额定力矩	$T'_n = \frac{cT_{\max}}{\lambda_T} \quad (\text{N} \cdot \text{m})$	式中, c 为计及电网压降及静摩擦的增大系数
9	电动机计算额定转速	$n'_n = \frac{KV_n}{\pi D} \quad (\text{r/min})$	(直流: 当 $F_2 = F_{\max}$ 时 $c = 1.15$, F'_1 、 $F_{45} = F_{\max}$ 时 $c = 1.4$;
10	电动机计算额定功率	$P'_n = \frac{T'_n n'_n}{9550} \quad (\text{kW})$	交流: 当 $F_2 = F_{\max}$ 时 $c = 1.25$, F'_1 、 $F_{45} = F_{\max}$ 时 $c = 1.5$); λ_T 为电动机过载系数
11	预选电动机	P_n 按 P'_n 及 30min 工作制选择电动机	
A 正常起锚状态校验			
12	第一阶段收余链工作时间	$t_1 = \frac{K(L-l)}{\pi D n} \quad (\text{min})$	
13	第二阶段变悬链线的工作时间	$t_2 = \frac{K[l - (H+h)]}{\pi D \frac{n_1 + n_2}{2}} \quad (\text{min})$	式中, n 值均为相应 T 值在电动机固有特性上的工作点转速
14	第三阶段锚破土工作时间	0.5~1min	
15	第四阶段收锚出水工作时间	$t_4 = \frac{K(H+h)}{\pi D \frac{n_3 + n_4}{2}} \quad (\text{min})$	
16	简易负载图		

续表

序号	计算值名称	公 式	备 注
17	电动机等效转矩	$T'_{mcs} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + \frac{1}{3}(T_1^2 + T_1 T_2 + T_2^2) t_2 + T_2^2 t_3 + \frac{1}{3}(T_3^2 + T_3 T_4 + T_4^2) t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}$	$T_{st} = 2T_n$
18	起锚总时间	$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \text{ (min)}$	
19	折算至标准工作制 30min 时的转矩	$T_{mcs} = T'_{mcs} \sqrt{\frac{NT}{30}}$	
20	转矩校验	$T_{mcs} \leq T_n \text{ 合格}$	
21	起锚速度校验	$\frac{H+h}{t_4} \geq V_n \text{ 合格}$	
B 应急起锚状态校验			
22	起锚时间	$t' = \frac{KL_s}{\pi D \frac{n'_1 + n_4}{2}}$	n'_1 为相应 T'_1 值在电动机固有特性上的工作点转速
23	简易负载图		
24	电动机等效转矩	$T'_{mcs} = \sqrt{\frac{T'^2_1 + T'_1 T'_4 + T'^2_4}{3}}$	
25	折算至标准工作制 30min 时的转矩	$T_{mcs} = T'_{mcs} \sqrt{\frac{N'_t}{30}}$	
26	转矩校验	$T_{mcs} \leq T_n \text{ 合格}$	
C 系统状态校验			
27	系缆时的电动机轴阻力矩	$T_m = \frac{F_m D_2}{2K_2 \eta_2}$	
28	转矩校验	$T_m \leq T_n \text{ 合格}$	
29	系缆速度	$V'_m = \frac{\pi D_2 n_m}{K_2}$	n_m 为相应 T_m 值在电动机固有特性上的工作点转速
30	系缆速度校验	$V'_m \geq V_m$	

2.4 电动系泊绞车和锚机电气控制线路

2.4.1 电动锚机的特点

起锚系缆机械是一种短期重复工作或断续周期工作的甲板机械设备，对调速性能要求不高，电力拖动性能要求也不高。目前国内外船舶大都采用简单可靠的交流变极变速的船用起重交流三相笼型异步电动机为动力机。大多以双速二绕组或三速二绕组两种类型为主，个别小功率辅助绞车也可采用同样结构和电气性能的船用起重交流三相单速笼型异步电动机，这种异步电动机为防水式，带直流圆盘制动器的结构形式，其定子单速的有一套绕组，双速及三速的有两套绕组。例如选用 JZ₂-H 系列的船用起重电动机带直流励磁绕组的圆盘制动器，11kW6 极以下的小容量单速电动机（4 极或 6 极）其制动器的直流电源是利用电动机本身每相绕组中间抽头经硅二极管整流后供给，接线如图 6.2-15 所示。在接触器主触头接通时，动合副触头同时闭合接通，将放电阻短接，制动器绕组通过工作电流吸动制动器衔铁使制动器释放，电动机开始正常运转。接触器断开后，制动器绕组断电并通过放电阻放电，制动器弹簧将衔铁顶回并压紧制动

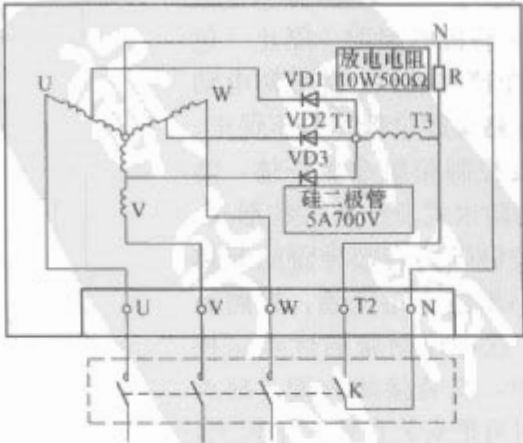


图 6.2-15 单速锚机电动机绕组及制动器接线图

阻短接，制动器绕组通过工作电流吸动制动器衔铁使制动器释放，电动机开始正常运转。接触器断开后，制动器绕组断电并通过放电阻放电，制动器弹簧将衔铁顶回并压紧制动

片将转子刹住，电动机快速停止运转。

双速和三速电动机制动器的直流励磁电源是由外部控制电路提供的。圆盘制动器均带有人工释放装置供检修时松开刹车。

双速电动机和三速电动机的绕组和制动器接线见产品说明书。

这种类型的电动机是短时 S2 或断续周期 S3 工作制，其 $F_c=25\%$ 或 40% 工作定额，能经济地适用于锚机和绞缆机的工作状态，且可靠性相对较高。此外，它具有较大的起动转矩，能常为 2 倍以上额定转矩值，并且起动电流小，一般只有 5 倍的额定电流，各挡均允许直接起动（但在锚绞机的实际使用中要求控制系统应设置自动逐级延时起动，尤其从中速转到高速挡）。其缺点是低速挡的效率和功率因数较低，所以其额定电流较大。

2.4.2 电动起锚机控制方式

船舶起锚机电力拖动控制，一般都采用以下几种控制方式：即磁力起动器控制，主令开关直接控制，继电器接触器控制和可编程控制器（PLC）控制。

2.4.2.1 磁力起动器控制

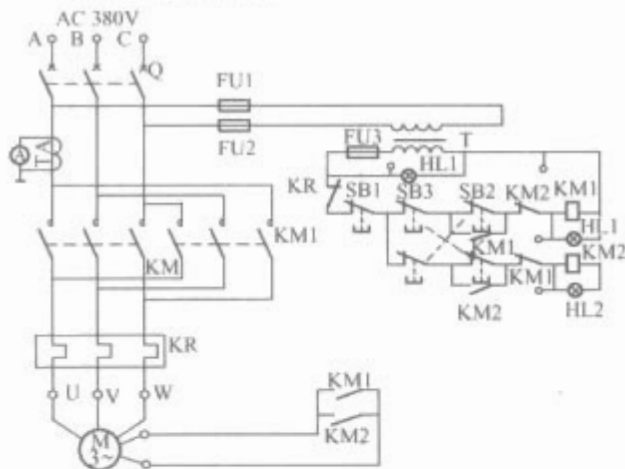


图 6.2-16 采用磁力起动器控制的系泊绞车控制线路

这是一种适用于交流单速电动机的控制方式。是一种用可逆磁力起动器控制电动机的起动、停止和换向，并能对电动机进行过载和失压保护的控方式。适用于一般的系泊或移船绞车。典型的控制电路见图 6.2-16。控制线路简单，不作详述。

2.4.2.2 主令开关直接控制

这种控制方式适用于内河船舶小型的起锚绞盘，用以控制小容量双速交流电动机的起动、停止（包括刹车）、变速和换向，并能对电动机及相关电路实施过载和失压保护。主令开关及控制箱组合成一体，防护等级仅为防水式 IP56 的结构形式。采用主令控制开关直接控制的起锚系统绞盘小型组合控制箱，线路见图 6.2-17。这种控制箱的优点是控制比较简单，安装接线方便。缺点是这种控制箱是安装在露天甲板上，使用环境条件比较差，元器件容易受潮，要经常注意维护。

2.4.2.3 继电器接触控制双速和三速电动机

这是一种由专用主令控制器操

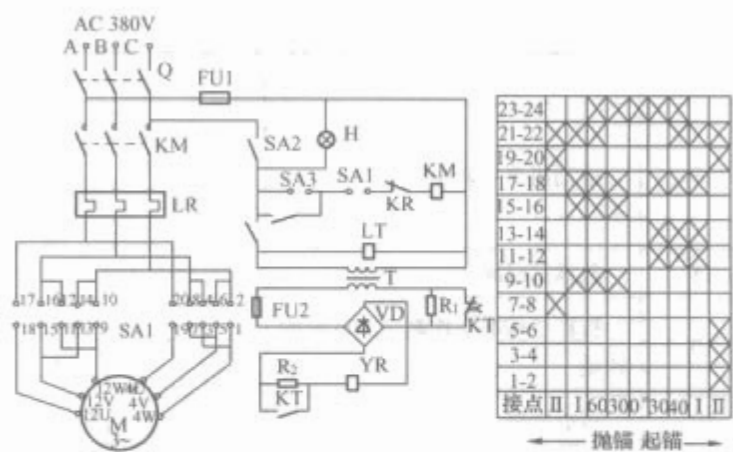


图 6.2-17 起锚系统绞盘采用主令开关直接控制的控制线路

纵，通过接触器对电动机的起动、停止、变速和换向进行控制，并具有过载和失电压保护等功能。主令控制器为防水式结构，可安装于露天甲板锚泊机械装置旁，控制箱为防护式，安装于舱室内。

(1) 起锚系统绞盘机械双速电动机控制线路，见图 6.2-18。主令控制器正起锚系统绞盘机械双速电动机控制线路，见图 6.2-18。主令控制器正反转均为两挡位置，分别控制两挡速度，每一挡分别接通一套电动机绕组，两挡速度均可直接起动，正反转为可逆对称线路。线路中设有失电压保护、零位保护、过载保护及控制回路短路保护。

(2) 三速起锚系统绞盘机械电气控制线路见图 6.2-19。主令控制器正反转各有三挡位置，分别控制三挡速度，由于低速与中速合用一套绕组，需由接触器进行 Δ 与 YY 转换完成。低速与中速可直接起动，高速则通过中速延时过渡起动。由于电动机的中速与高速是设计成恒功率的，因此线路中设置了当高速过载时能自动切换到中速挡运行的保护环节。该保护由过电流继电器来完成，为避免高速挡换挡电流使过流继电器产生误动作，由一个时间继电器瞬时短接，控制线路为正反转可逆对称。线路中有失电压保护、零位保护、过载保护及控制回路短路保护。

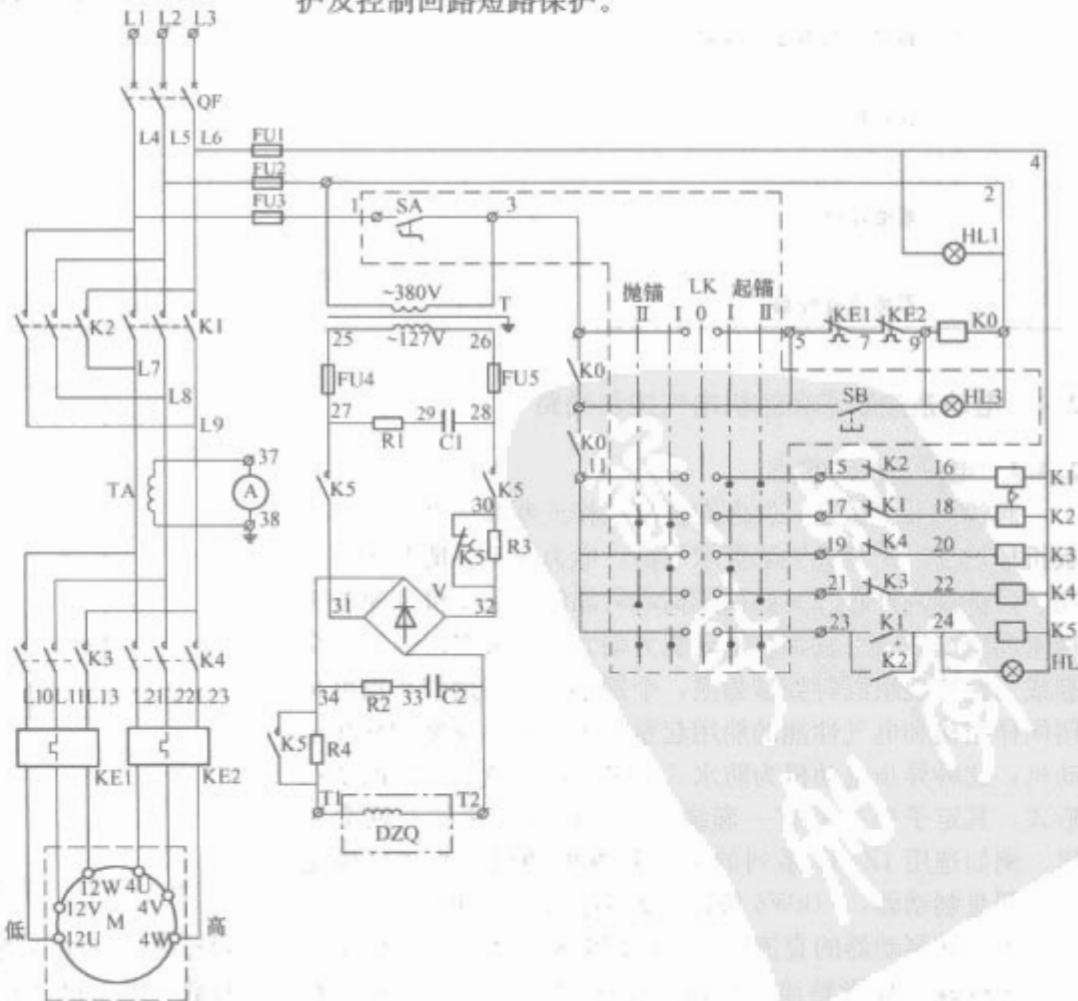


图 6.2-18 起锚系统机械双速电动机控制线路

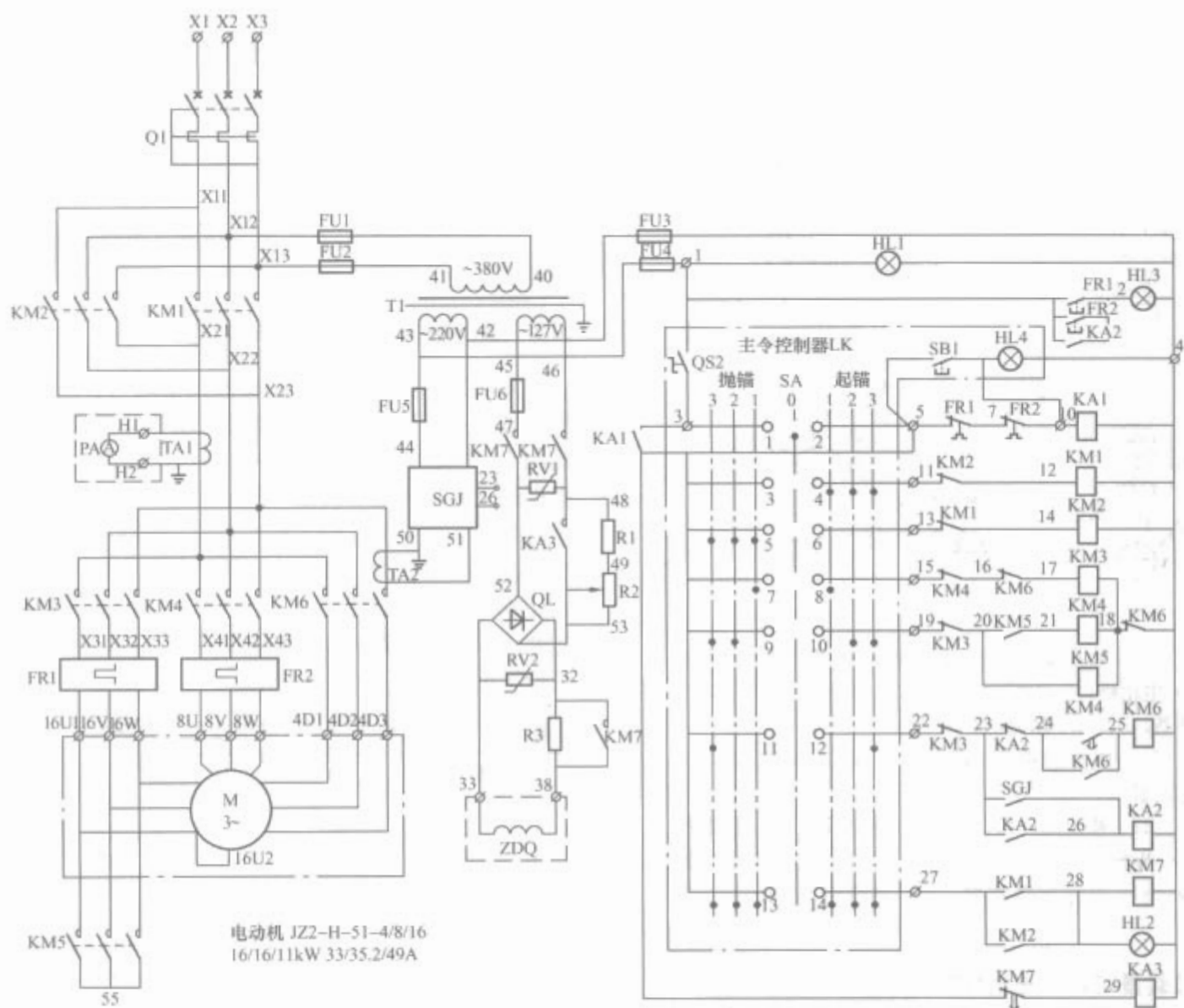


图 6.2-19 三速起锚机系统机械的电气控制线路

3 船舶舵机的电气传动控制

3.1 舵机装置

舵机能使航行中的船舶按驾驶人员的意图改变航向，使船舶具有良好的可操纵性、稳定性和可靠性。舵机设备是保证船舶机动性和生命力的主要设备之一。该设备一般由控制系统、舵机、转舵机构、舵叶等组成。

舵机是用以产生转舵力矩而使舵偏转的机械。根据操舵能源的不同，舵机可分为人力舵机、气动舵机、电动舵机和电（动）液（压）舵机等。电动舵机由电动机、蜗轮、蜗杆、舵扇、舵柄等组成，它的结构简单，操作方便，工作可靠，适用于中小型船舶上，在 20 世纪 70 年代以前应用较多。

70 年代以后大多数船舶均采用电（动）液（压）舵机，主要由电动机、油泵、管路等机械组成，它具有体积小、质量轻、转矩大、传动平稳、噪声小等优点，是大型船舶采用的舵机。液压舵机按执行机构可分为柱塞式（双柱塞和四柱塞）、活塞式和转叶式等多种。按调速型式可分为阀控型和泵控型两种。

阀控型舵机的液压系统采用定量泵（低压系统多采用叶片泵，高压系统采用轴向柱塞泵），控制阀采用电磁换向阀或伺服阀，系统及其控制相对简单，造价较低。阀控型舵机液压系统原理图可见图 6.2-20。

泵控型舵机系统一般都采用双向变量液压泵和闭式系统，其控制系统包括两部分：控制舵机室受动元件（例如同服油缸活塞）的电气控制系统和控制泵变量机构的浮动杆机

械追随机构；反馈发讯器是由舵机室受动元件带动的。新型舵机为简化设备和调试，趋向于取消浮动杆，以电气控制系统直接控制泵的变量机构，或直接采用电液比例变量泵，这时反馈发讯器直接由舵柄或舵杆带动。泵控型舵机液压系统原理图可见图 6.2-21。

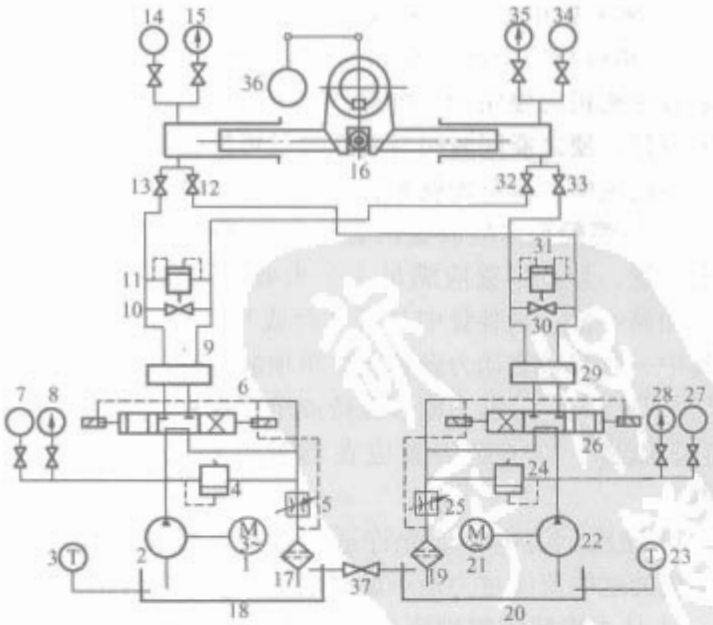


图 6.2-20 阀控型液压往复舵机液压系统原理图
1、21—电动机；2、22—油泵；3、23—温度计；4、24—溢流阀；5、25—节流阀；6、26—电液（磁）换向阀；7、14、27、34—压力传感器；8、15、28、35—压力表；9、29—连锁装置；10、30—旁通阀；11、31—安全阀；12、13、32、33、37—截止阀；16—推舵机构；17、19—滤器；18、20—油箱；36—电气反馈装置

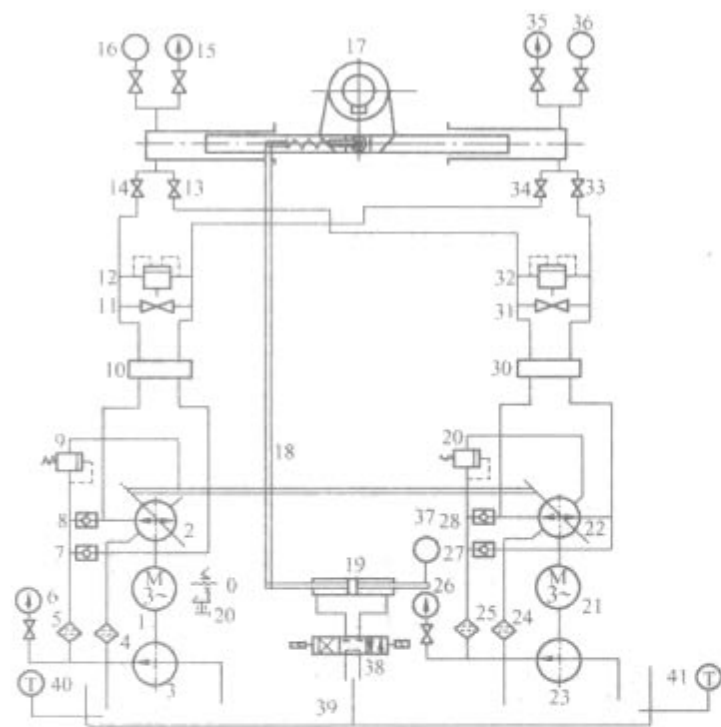


图 6.2-21 泵控型液压往复舵机液压系统原理图
1、21—电动机；2、22—变量泵；3、23—辅泵；4、24—回油滤器；5、25—精滤器；6、15、26、35—压力表；7、8、27、28—补不由单向阀；9、29—被压溢流阀；10、30—连锁装置；11、31—旁通阀；12、32—安全阀；13、14、33、34—截止阀；16、36—压力传感器；17—推舵机构；18—机械反馈装置；19—执行机构；20—手动应急操纵机构；37—电气反馈装置；38—操纵电磁阀；39—油箱；40、41—温度计

3.2 舵机装置对电力拖动控制的要求

由于舵机对于船舶的安全具有其特殊性，一旦失灵，船即会失去控制，甚至发生事故。因此我国《钢质海船入级与建造规范》和 ISO 的《国际海上人命安全公约》对舵机提出了明确的要求，要求舵机必须具有足够的转舵力矩和转舵速度，并且在某一部分发生故障时，应能迅速采取替代措施，以确保操舵能力。

因此对舵机的电气传动控制系统也有一定的技术要求：

1) 从主配电盘到舵机应当用两路分离较远的馈电线（其中一路可与应急配电盘相连）对舵机供电。驾驶室内操舵装置和舵机应使用同一电源。舵机装置的供电电路应有足够的容量，使之能同时向与它连接且可能需要同时工作的所有电动机供电。应急操舵装置应由应急电网供电。

2) 每艘船至少应设置两套操舵装置即主操舵装置和辅操舵装置，且其布置应满足 1 个失效时不致使另一个也失效。如果一套操舵装置中具有 2 台或几台相同的动力设备，当其中一台管系或动力设备发生单项故障时，此缺陷应能迅速被隔离，使操舵能力能够保持或迅速恢复，这时可不设两套操舵装置。主操舵装置应在驾驶台和舵机舱都设有控制器。

3) 液压舵机电动机允许适当过载，当安全阀开启时，电动机的过电流或过力矩不超过电动机技术条件的规定。

4) 从主操舵装置到应急操舵装置，油泵机组和操纵方式的转换应迅速可靠。手动进行转换的时间不大于 10s，带自动检测、报警、转换装置的时间不大于 45s。

5) 操舵装置电动机主回路应设短路保护和过载、断相报警装置，过电流保护应不小于满载电流的 2 倍，并要允许适当的起动电流通过。拖动控制线路和驾驶室内操作的主、辅操舵装置控制系统都应设短路保护装置。

6) 操舵装置中应设有油箱低液位、液压油高油温、液压油滤油器压力差等报警项，上述报警应为声光报警。在油箱最低液位时，报警的同时能自动切换机组。操舵装置中还应设有电动机运行、操纵部位、操纵方式等状态指示。报警和状态指示在驾驶室、集控台、舵机舱内均设置。

7) 操舵装置应设有舵角限位器（电气和机械限位器）。限位器应工作可靠。

3.3 液压舵机电动机容量的计算

船舶液压舵机电动机拖动液压泵是属长期连续工作制，所以选用连续工作制 S1 类型的电动机，液压泵不调速，可选用 Y-H 系列交流笼型异步电动机。液压舵机功率计算需根据最大舵杆力矩和转舵时间来确定。计算所得的舵机功率不需进行发热校验，因为最大力矩在偏转周期中出现的时间短，发热裕量较大。带有液压传动的舵装置电力拖动的计算是必须预先确定泵的排量，然后再选择电动机的容量。中铰柱塞式双舵液压舵机和单舵拨叉柱塞式液压舵机，电动机容量计算见表 6.2-2 和表 6.2-3。

表 6.2-2 中铰柱塞式双舵液压舵机计算公式

名 称	公 式	符号注解(含计算单位)
M 输出力矩(kN·m)	$M = \frac{\pi D^2}{4} Z (p_1 - p_0) R \eta_m / \cos 35^\circ \times 10^6$ (kN·m)	D 为柱塞直径, m R 为舵柄半径, m p ₁ 为油缸进口压力, MPa p ₀ 为油缸出口压力, MPa Z 为油缸对数 η _m 为机械效率 M 为输出力矩, kN·m
S 柱塞行程(m)	$S = R(\sin 35^\circ + \sin 30^\circ)$	R 为舵柄半径, m
V 油缸容积(l)	$V = \frac{\pi D^2}{4} S$	D 为柱塞直径, m S 为柱塞行程, m
Q 油泵所需流量(l/s)	$Q = ZV60/t$	V 为油缸容积, l t 为转舵时间, s Z 为油缸对数
N ₁ 主油泵所需功率(W)	$N_1 = (p_1 - p_0)Q / 60 \eta_v \eta_m$	p ₁ 为系统设计压力, MPa p ₀ 为主泵回油压力, MPa Q 为要求主泵流量, l/s η _v 为主泵容积效率 η _m 为主泵机械效率

表 6.2-3 单舵拨叉柱塞式液压舵机计算公式

名 称	公 式	符号注解(含计算单位)
M 输出力矩(kN·m)	$M = \frac{\pi D^2}{4} Z (p_1 - p_0) R \eta_m / \cos^2 35^\circ \times 10^6$ (kN·m)	D 为柱塞直径, m R 为舵柄半径, m p ₁ 为油缸进口压力, MPa p ₀ 为油缸出口压力, MPa Z 为油缸对数 η _m 为机械效率 M 为输出力矩, kN·m
S 柱塞行程(m)	$S = 2R(\tan 35^\circ + \tan 30^\circ)$	R 为舵柄半径, m
V 油缸容积(l)	$V = \frac{\pi D^2}{4} S$	D 为柱塞直径, m S 为柱塞行程, m
Q 油泵所需流量(l/s)	$Q_1 = V60/t \eta_{v1}$	V 为油缸容积, l t 为转舵时间, s η _{v1} 为系统容积效率
N ₁ 主油泵所需功率(W)	$N_1 = k(p_1 - p_0)Q / 60 \eta_{v2} \eta_m$	p ₁ 为系统设计压力, MPa p ₀ 为主泵回油压力, MPa Q 为要求主泵流量, l/s η _{v2} 为主泵容积效率 η _m 为主泵机械效率

3.4 舵机装置电力拖动与控制线路

3.4.1 舵机装置电力拖动设计

舵机电力拖动设计时应能满足舵机技术性能的要求，在舵机舱和驾驶室等不同操纵部位都能控制电动机起停，系统设有操纵部位转换开关，以防同时操纵。油泵机组的启动一般具有手动和自动两种方式，通过转换开关进行方式切换。在手动方式下可按起、停按钮，分别起、停各油泵机组。在设备调试或检查时使用这种操纵方式。

油泵机组启动时，会产生较大的线路压降，使电网电压波动较大，在船舶电站容量允许的情况下可直接启动，如果容量有限通常采用星/三角降压启动。控制线路可见图 6.2-22。图中 M1 为主泵电动机，M2 为伺服泵电动机。

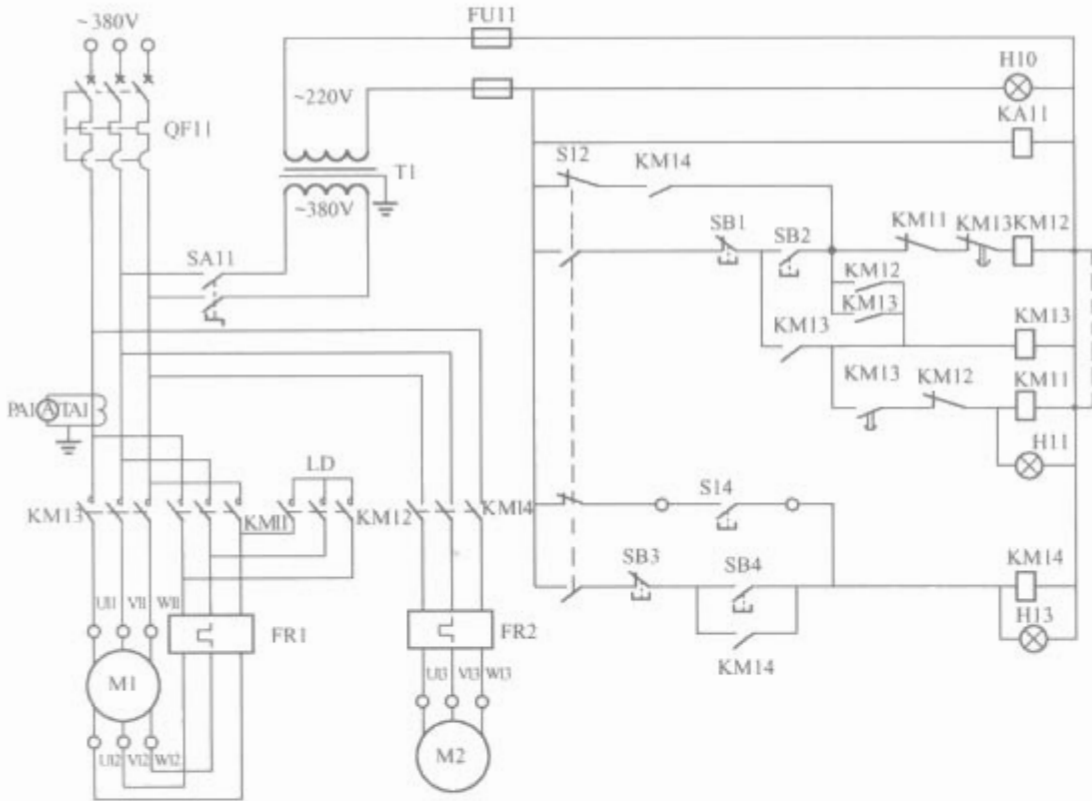


图 6.2-22 油泵机组星/三角降压启动原理图

为保证电动液压系统的工作可靠，电动油泵机组既可以采用冷备旁待方案，各台机组可单独运行，互成自动切换冷备旁待，也可以两台机组并联运行，这样当一套动力设备失效时，另一套能迅速投入工作。在图 6.2-22 所示线路中可增加一套完全相同的控制线路和自动切换线路，当一套机组出现故障时切掉该机组电源，同时自动切换至另一套机组。

拖动控制线路中设有过载及断相报警，短路保护等，由

于舵机性能的特殊性，要求过载时只报警并不让电动机停止运转，如若发生断相故障时则既要报警也同时停机并自动切换至另一套机组。线路的短路保护通过熔断器或断路器来实现，发生短路故障时能及时将短路部分和电源脱离。

3.4.2 操舵控制系统

舵机装置的操舵控制系统有简单控制、随动控制等方式。

3.4.2.1 简单操舵系统

在简单控制方式中扳动操舵手柄直接控制，通过观察舵角指示器，到达指定角度时，断开指令信号。操舵人员是按舵令要求并观察舵角指示器及罗经的航向角变化来操作的。手柄操舵的冲舵角较大，操舵准确性受操舵人员的经验影响。这种操舵方式仅适用于内河小型船舶操舵以及大中型船舶的应急操舵。

3.4.2.2 随动操舵系统

随动操舵控制是舵机操舵控制系统中的主要形式。随动控制方式中手轮位置与舵叶角度自动同步，只要把操舵手轮转到所需的角位置就可使舵叶自动停在指令角度上。

随动操舵系统框图见图 6.2-23。

随动操舵时，指令机构即手轮转动发出控制指令，输出给定舵角电信号，作用于放大器，驱动电液（磁）换向阀动作，由电液（磁）换向阀控制变量泵斜盘偏转，进而改变舵叶转角。与舵柄连接在一起的反馈机构随之转动发出舵角反馈信号，当操舵信号和舵角负反馈信号大小相等时，舵停止在给定的舵角位置。随动操舵是一个闭环的随动系统，能根据偏差进行自动调节。

为了减小 S 形航迹的幅度，船舶在返回正航向过程中，必须操回舵。

随动操舵仪系列按 CB 3113—1981 标准可分为电子式、继电式和液压式三种型式，其主要规格参数见表 6.2-4。



图 6.2-23 随动操舵系统框图

表 6.2-4 随动操舵仪系列规格参数

名称	电子式操舵仪				继电式操舵仪	液压式操舵仪	
	DD1	DD2	DD3	DD4	DJ1	DY1	DY2
型号							
电源	交流				380V/110V, 50Hz	380V/220V, 50Hz	
	直流				24V	24V	
耗电功率	≤350VA	≤350VA	≤500VA	≤350VA	≤100VA	≤100VA	
转舵速度 (°/s)	2.5~3 (单机) 5~6 (双机)	2.5~3	2~5	7	2.5~3	—	
转舵误差	≤±1°				≤±1°	≤±1.5°	
灵敏度	0.5°~2°可调				0.5°~2°可调	—	
控制元件	直流 24V 电磁阀或电液阀				中间继电器	伺服油缸	1. 伺服油缸 2. 直流 24V 电磁阀

续表

参数	名称 型号	电子式操舵仪				继电式操舵仪	液压式操舵仪	
		DD1	DD2	DD3	DD4	DJ1	DY1	DY2
最大操舵 角度		左 35° 右 35°	左 32°~35° 右 32°~35°	左 35° 右 35°	左 40° 右 40°	左 35° 右 35°	左 35° 右 35°	
操舵方式		随动、 手动	随动、手动、 应急	随动、 手动	随动、 手动	随动、 手动	随动、 手动	随动、手 动、应急
操舵地点		驾驶室、桥 楼、舵舱	驾驶室、舵舱	驾驶室、桥楼、舵舱		驾驶室、桥楼、舵舱	驾驶室、舵舱	
工作方式		连续				连续	连续	
报警范围		失电压、过载				失电压、过载	失电压、过载	



第3章 船舶舱室机械电气控制

船舶舱室机械所涉及的设备很多,主要包括各型船舶的空调和冷藏装置、冷水机组、海水淡化装置、辅锅炉、生活污水和油污水处理装置、膜空分制氮装置、各类型泵、空压机组、通风机、各种阀门等,是每一船舶不可缺少的设备。

1 船舶空气调节装置的电气控制

1.1 主要控制功能

船舶空气调节装置一般简称为船用空调器,是指用于克服外界气候变化等诸因素的干扰,调节船舶舱室空气温度、湿度参数稳定,为船员提供舒适生活和工作环境的空气处理装置。船用空调器的功能可概括为夏季降温除湿、冬季加热增湿、过渡季节通风。除一些特种用途的空调器外,一般各种型式的空调器都会包括以上功能。为满足上述的功能,无论何种型式的空调器都必须包含以下两个基本部分和相应的控制功能。

空气处理装置:这是空调系统中对空气进行加热、冷却、加湿、干燥和净化处理的关键设备。包括:新风采入段(含新风预热段)、空气过滤段、回风混合段、表面冷却/加热器段、蒸汽加湿段等设备。空气处理装置中需要电气控制的主要是调节表面冷却/加热器进水(汽)量的电动三通调节阀、加湿蒸汽流量调节阀或电磁阀等,如在冬季采用电加热还须根据回风温度控制电加热器的开关。另外在空气过滤段须为每一个空气过滤器(高、中、低效)设置差压开关,以便在滤器堵塞时产生报警信号提醒船员清洗。

空气输送设备:这类设备中主要包括风机和风道系统、调节风阀等辅助设施。风机是船用空调器输送空气的动力设备,通常为离心式风机。在定风量空调系统中,对风机只须作起/停控制;对于变风量系统须采用多级变速电机或变频器对风机进行调速控制。在风道系统中,尤其是送、回风口合理布置温、湿度传感器也是空调电气控制的重要环节。空调器在送、回风口以及新风口可设置由二位或三位式电动执行机构驱动的调节风门,送、回风口调节风门主要起到调节空调器总送风量的作用,新风门可调节新风回风混合比例。对于一般的空调器,电气控制系统对执行机构输出开关信号,各调节风门即可根据预先的设置开启到一定的开度,从而保证空调器达到要求的送风量。对于某些空调系统可以按要控制新风门在冬夏季保持较小的开度以减少制冷/加热的能量消耗。

由于大中型船舶空调系统的能量规格较大,为减小单个设备的体积会采用独立的冷/热源,如冷水机组、低压蒸汽锅炉等,因此空调器是利用冷/热媒水或低压蒸汽冷却或加热空气,这种空调器称为间接式空调器,其构成主要是上述两个基本部分。控制系统图如图6.3-1所示。

船用空调器另外一种主要型式是直接蒸发式空调器,这种空调器采用制冷剂在表面式冷却器中直接蒸发的方式冷却空气,一般情况下除具有同间接式空调器相似的空气处理和输送部分外,还须配置制冷系统。因此直接式空调器的电气控制装置还须为制冷系统提供控制和联锁保护功能。

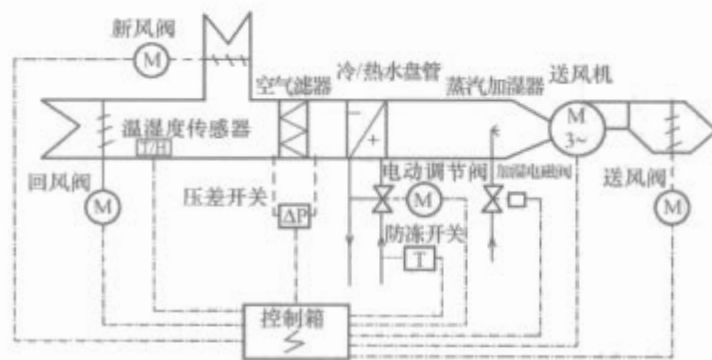


图 6.3-1 船用间接式空调器控制系统图

船用直接式空调器通常采用压缩式制冷系统,主要由压缩机、水冷式冷凝器、蒸发器以及相应的制冷管系、阀件等组成。其中须电控装置控制的主要是压缩机的起/停和能量调节以及制冷系统的安全保护,如高低压保护、滑油压差保护、冷却水压力保护等。直接式空调器采用蒸发器作为空气冷却设备,因此不采用电动调节阀调节冷媒流量,而代之以调节制冷剂蒸发压力的热力膨胀阀(机械式)。当前在国外设备中采用较多的由变频器-电子膨胀阀组成的变流量制冷系统,需要电气控制装置提供较为复杂的控制功能。这种控制方式国内船用空调设备中尚未采用,在此不作详述。

现代船舶中的集中式空调系统中较多采用间接式空调器,直接式空调器在一些局部空调系统中采用,是作为集中式系统的一种补充,一般能量规格较小(3万 kcal/h 以下),设备的功率较小。典型的直接式空调器控制系统图见图6.3-2。

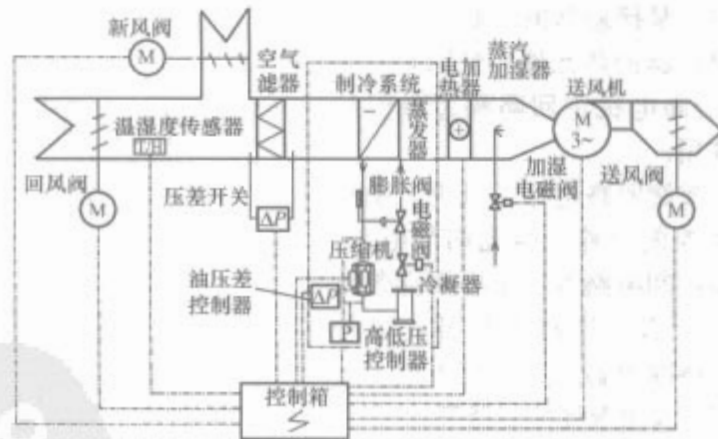


图 6.3-2 船用直接蒸发式空调器控制系统图

1.2 船舶空气调节装置分类及其电气控制系统的工作原理和特性

船舶空气调节装置的种类很多,比如组装式、立柜式、分体式、吸顶式等,但这些都是针对空调器结构上的特征来分的。从电气控制装置的组成来分析,直接式和间接式空调器的区别较为典型。以下分别以 ZKZ 型船用组装式空调器和 DK-1.5 型船用柜式空调器为例详细分析直接式和间接式空调器电控系统的原理和特点。

1.2.1 ZKZ(S)-4 型空调器电气原理

ZKZ(S)-4 型空调器电气原理图见图 6.3-3。

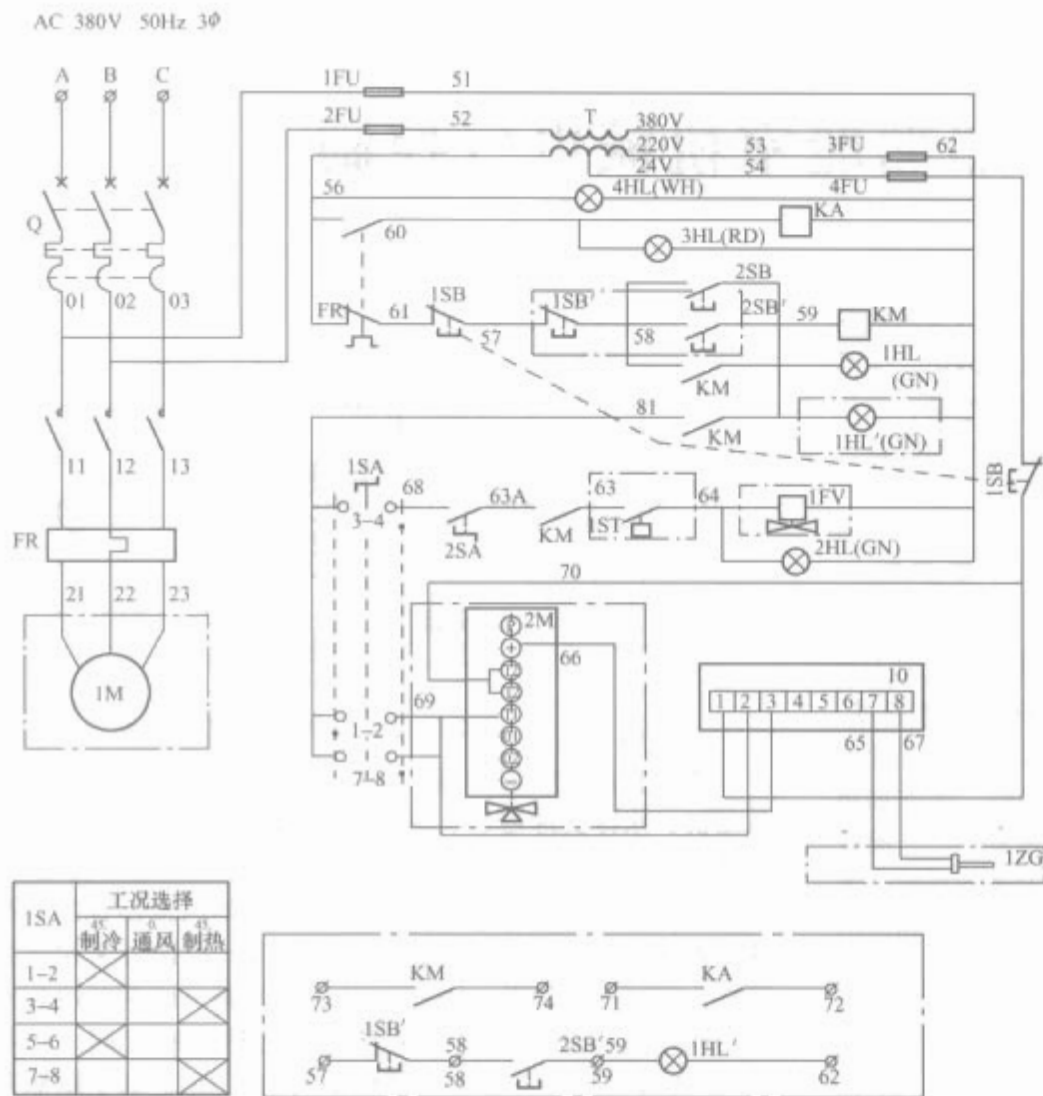


图 6.3-3 ZKZ(S)-4 型空调器电气原理图

ZKZ(S)-4 型空调器电气控制系统由主回路和控制回路组成。主回路是整个控制箱和风机电动机的供电回路，该设备采用三相三线制供电，电制为三相 380V、50Hz。主回路设有自动空气断路器，起到整个电路短路保护的作用。电机供电回路上是接触器的主触头和热过载继电器的热元件，分别起到吸合/分断电机主回路和过载保护的作用。

控制回路包含了风机电机启动控制电路、温度调节电路、加湿控制电路等，主要元件包括主令开关、控制变压器、接触器、热继电器、中间继电器、熔断器以及温湿度控制器等。

由于船舶空间的限制，一般单台空调器的送风量较小，因此风机电机的功率较小，可以采取直接起动的控制方式，如图 6.3-3 所示。本例中风机的启动与加湿电磁阀联锁，即风机停止则加湿电磁阀断电。

该设备中加湿控制采取二位式控制，即当回风湿度小于设定值的下限时，电磁阀通电加湿；当回风湿度大于设定值的上限时，电磁阀断电关闭。

该设备的空气温度调节采用

比例积分的控制算法，具体过程是温度控制器采样回风温度值与设定值比较，其偏差经过比例积分 (PI) 计算输出 0~10V 控制信号，电动三通调节阀接受信号后调整阀位，继而改变进入空气冷却器的冷/热媒水流量从而达到温度调节的目的。可通过人工方式切换控制器冬夏季工作模式，从而改变输出的控制信号与阀位变化的正反作用关系。

作为辅助功能，本例中另设置了防冻开关防止空气冷却器因冷媒水温过低而冻裂。另外虽然本例中简化了空气滤器压差保护，但在许多场合该功能还是必要的。本例中也简化了对各种风门的电气控制，仅采用手动调节风门，这种设计对调节性能要求不高的船舶空调系统中是常见的。

1.2.2 DK-1.5 型船用立柜式空调器电气原理

DK-1.5 型空调器电气原理图见图 6.3-4。正如第 1.1 节所述，采用直接蒸发制冷方式 DK-1.5 型立柜式空调器与间接式空调器有着相似的风机电机主控电路，增加了制冷压缩机 (2M) 和电加热器 (1,2,3EH) 的主控电路。

DK-1.5 型空调器电气控制系统与 ZKZ(S)-4 型的显著区别是具有制冷系统的控制电路。如图所示，压缩机的控制电路与风机的控制电路联锁，采用直接起动的方式，压缩机的控制电路与各控

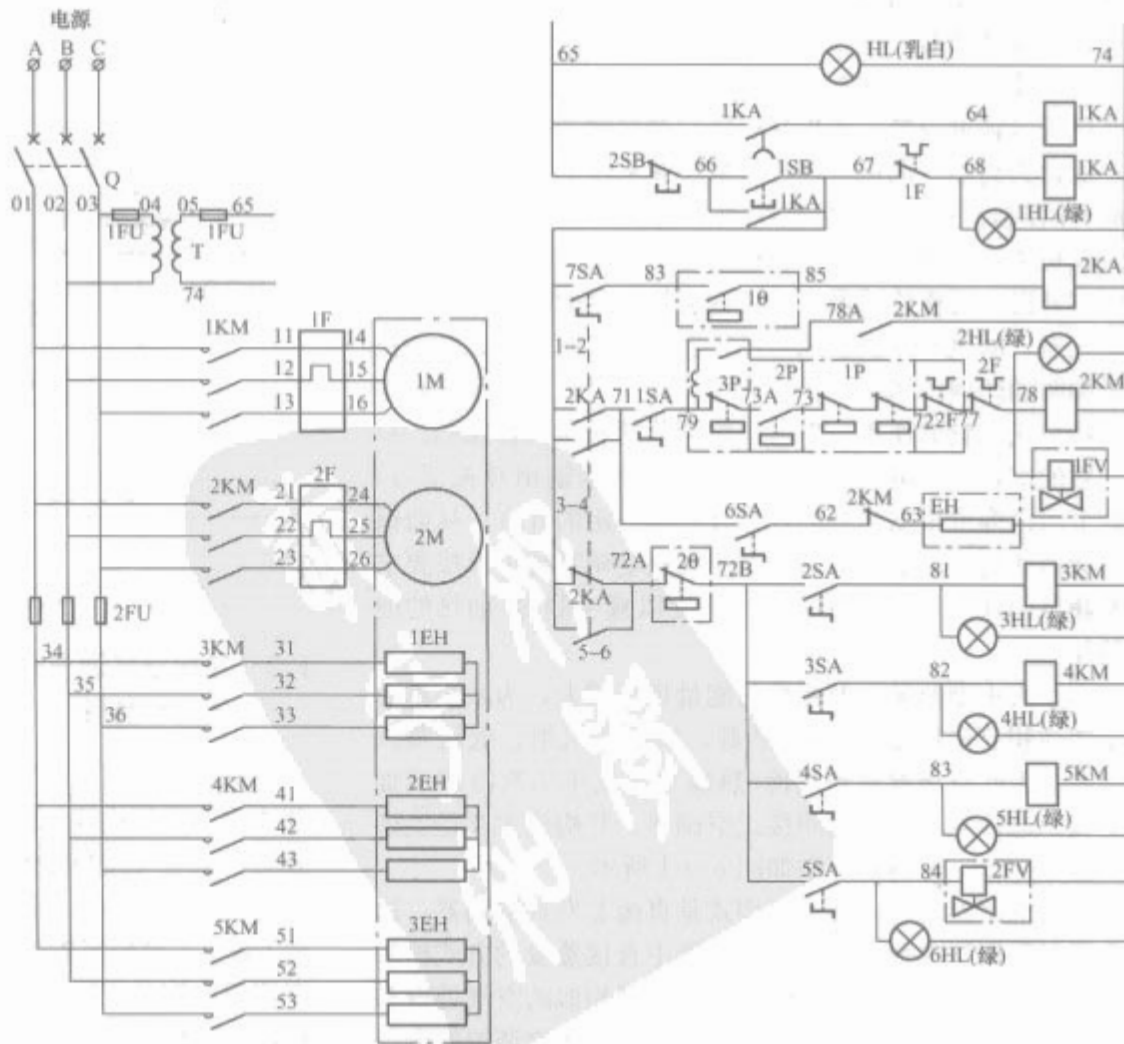


图 6.3-4 DK-1.5 型船用立柜式空调器电气原理图

制器联锁,具有油压差保护(3P)、冷却水压保护(2P)、高低压保护(1P)、压缩机绕组温升保护2F'以及过载保护2F等功能。压缩机具有手动和自动两种控制方式,通过组合开关7SA切换。手动时压缩机由转换开关1SA起停,自动时由温控器10控制。压缩机起动的同时供液电磁阀1FV通电打开。当压缩机停机后可接通开关6SA给滑油加热器通电,这个功能在有些设备上自动温控的,滑油加热是保证制冷系统可靠运行的重要措施。

根据不同的季节,控制系统提供制冷/制热切换功能,转换由组合开关7SA实现。当切换到制冷模式,上述压缩机的控制电路接通工作。当切换到制热模式,冬季加热的线路接通。为防止“干烧”电加热器与风机须联锁,另外在加热器出风侧还设置了超温保护器20(保护值70℃)。本例中电加热可手动(7SA)和自动温度(10)控制;整个电加热器共分三组,根据需要由人工操作转换开关(2SA、3SA和4SA)分别接通投入工作。在冬季工作模式下还须进行加湿控制,此功能通过手动操作转换开关5SA接通加湿电磁阀实现。

从上述工作原理可以看出两型空调器电气控制的基本方式大同小异,如电动机的起停控制、保护联锁方式等。

两种空调器在温度控制方式上都采取了定风量变风温的调节方式。具体的原理是间接式空调通过水量调节阀改变进入空气冷却器的冷/热媒水量,从而改变了热交换的效果,因此改变了空调器的出风温度;直接式空调器根据温度变化起停/停止制冷压缩机,从而也改变了蒸发器的平均换热效果,起到了在一段时间内调节平均出风温度的作用。以上的调节方法由于改变了风温,出风的相对湿度可能升高,也就引起舱室相对湿度的升高,可能带来不舒适的感觉。但这种方法的实现相对另外一种变风量的方法较为经济,对整个空调系统的设计要求较低,因此在目前国内船舶空调设备上采用较多。

在温度控制的实现中,间接式空调器采用的是比例积分(PD)控制算法,因为它的执行机构是可连续调节的电动调节阀。而制冷压缩机的工作原理决定了直接式空调器只能采取两位式控制方法。另外在上述两型空调器其他电气控制电路中也大量采取了位式控制,甚至是手动控制,比如两者的湿度控制。因为船舶舱室的温度允许在±2℃间波动,湿度控制范围是40%~50%,所以并不是很精确的控制系统,采用两位式调节代替比例调节以简化系统也是可行的,同时由于元器件选用的简化提高整个电气系统的可靠性。

1.3 船舶空气调节装置的电气控制技术

1.3.1 电机启动及调速技术

1.3.1.1 风机

一般船用空调器通常采用笼型三相异步电动机作为风机电动机。在定风量空调系统中,送风机采用直接启动的方式。由于大多数船舶的空间狭小,所以一般采取分区域多台空调器小风量送风的系统形式,因此送风机电动机功率较小,无须采用降压启动减小电动机启动电流。只有在某些海洋钻井平台上采用单台空调器大风量送风的系统中,电机功率大于50kW才要求采用降压启动来减小对电网的冲击。

传统的直接启动和降压启动的设计原理参照本篇第1章3.1节。这里介绍目前另一种风机电动机常用的启动方法——部分绕组启动。其中典型的是Y-YY型启动方式:如图6.3-5所示启动时先接通K1,待转速接近同步转速时,再接通K2使全部绕组投入运行。由于采用这种方法

电机在启动瞬间是部分绕组工作,因此可降低启动电流。应该指出采用这种控制方式时应严格限定启动时单绕组的运行时间,否则由于单绕组运行输出力矩小将引起电动机过载。在许多进口电动机的产品资料中这个时间被限定为小于1s,并且在控制线路设计中必须为每一个绕组串接热继电器,电流整定值视绕组功率分配比而定。两个绕组都接通后必须设置互锁以防止一个绕组产生故障时另一个绕组处于单独运行状态。

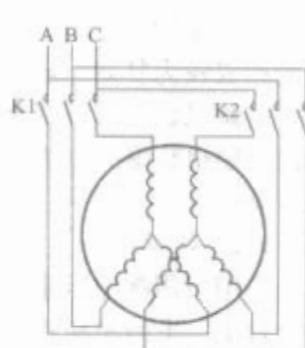


图 6.3-5 部分绕组启动(Y-YY型)

一些舱室内独立的小型船用空调器,如分体式空调器、风机盘管等,由于其风机功率较小(<250W),电动机通常采用单相电容运转异步电动机。该种电动机的工作原理是无论在启动或运转时,其定子副绕组与一个电容器串联后与主绕组一起接到电源上。在启动时,电容使定子副绕组和主绕组的电流相位相差 $\pi/2$,其合成的交变磁场可使转子获得起动力矩转动起来;在启动后电容可使电动机工作于接近圆形旋转磁场中,电动机的运行性能较好。典型的单相异步电动机启动电路如图6.3-6。

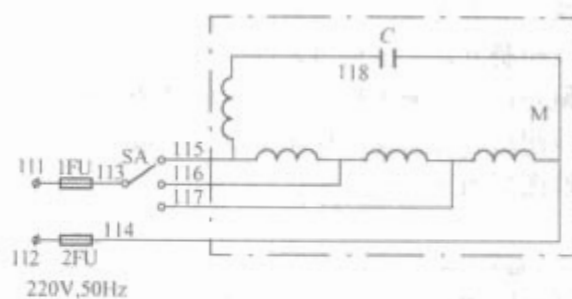


图 6.3-6 单相异步电动机启动电路

在常规的定风量空调系统中,不必通过调节风机转速来调节风量。但对于某些在空调季节和过渡季节采用不同送风量的系统来说可以采取变极变速电动机来有级调节转速。这种调节的原理是改变电动机定子绕组的对数,就可以改变旋转磁场及转子的转速。这种调速方法的调速比接近成倍比,如2:1。

一般可构成双速或三速电动机。典型的电气原理如图6.3-7所示。

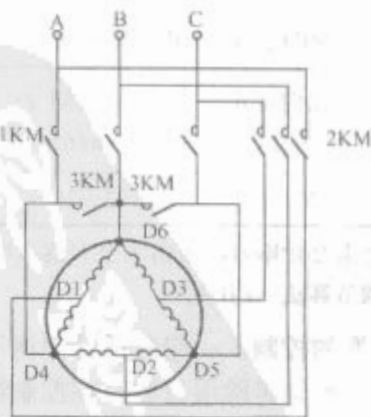


图 6.3-7 三相电动机变极调速主回路原理图

说明:图6.3-7是变极调速的电气主回路原理。其控制逻辑是接触器1KM吸合,电动机绕组以一个三角形接法运行,每绕组为两极;当释放1KM,2KM、3KM吸合,电动机转为星形接法,每绕组变为四极,转速降低一半。

三相异步电动机的另一种调速方式是变频调速。这种方

式在空调中的典型应用是变风量空调系统。但变风量空调系统的构成较为复杂，船舶上较少采用。只有在变极调速不能满足空调风机要求的变速比情况下，才采用变频器并预设几挡固定输出频率的方法进行有级变速控制，不过这种情况较为少见。

1.3.1.2 压缩机

船用空调制冷压缩机根据电动机与压缩机的连接型式分为全封闭、半封闭和开启式三种型式。其中前两种是电动机和压缩机组装在一个壳体内，开启式是电动机与压缩机分离，通过直连或挠性连接驱动压缩机。大多数船用直接式空调器选用的压缩机配置的电动机是小功率三相异步电动机，其起动方式一般采用直接起动。同样在海洋钻井平台采用的大能量直接蒸发空调器上，压缩机的功率较大（>100kW），根据用户要求须采取降压起动方式。目前这种空调器选用的许多进口压缩机，其电动机可以提供分绕组起动功能，所以采用这种起动方式也简便易行。以上几种压缩机起动控制电路的设计可参照本篇第 1 章 3.1 节和电动机起动控制设计的相关专业书籍。

由于目前船用空调器一般不采用可变流量的制冷系统，所以压缩机电动机没有调速要求。

1.3.2 空调器温湿度控制技术

1.3.2.1 间接式空调系统

从本章 1.2 节的实例可以看出水量调节是间接式空调最简单的温度控制方式。它通过采样回风温度，经过比例积分控制器对偏差计算，输出控制信号给电动调节阀。这样就构成了一个单回路温度负反馈控制系统。间接式空调器温度控制系统方框图如图 6.3-8 所示。

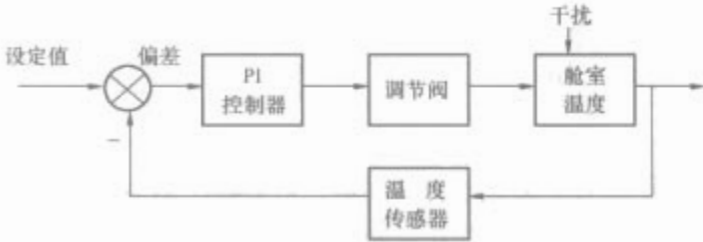


图 6.3-8 间接式空调器温度控制系统方框图

对于这个方法须指出的是水量调节对温度的控制作用存在较大的滞后效应，因此须在现场对控制参数作仔细调定。比例度（ δ ）和积分时间（ T_I ）可采用动态参数法、稳定边界法和衰减曲线法等方法调整，这里给出常用的经验法参数选用表，见表 6.3-1。

表 6.3-1 PID 调节常用经验参数			
调节参数	比例度 δ	积分时间 T_I	微分时间 T_d ①
被调参数	(%)	(min)	(min)
温度	20~60	3~10	0.5~3

① 在被调参数动态变化剧烈时可由小至大逐步增加此参数构成比例积分微分调节算法（PID）。

关于夏季湿度的控制，一般舒适性空调不对湿度作专门控制。因为降温过程也是除湿过程，在控制精度要求不高的情况下，将舱室温度控制在设定值范围内，湿度也能稳定在系统规定的范围内（40%~50%）。冬季加湿可采取两位式控制电磁阀或 PI 控制二通调节阀。

对于湿度控制要求高的场合，可选择温湿度控制兼顾的选择控制法。其原理是采用两个控制器分别计算输出温湿度调节信号，然后比较两个信号使调节阀接受调节输出信号绝对值较大（偏差较大）的参数控制，这样可以保证相互影响

的温湿度均具有一定的调节精度。温湿度选择控制方框图如图 6.3-9 所示。

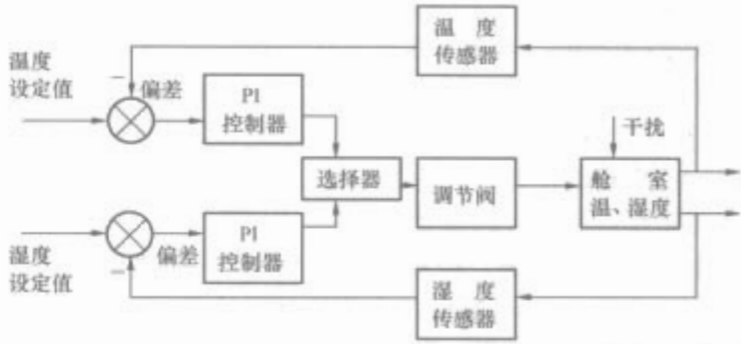


图 6.3-9 温湿度选择控制系统方框图

1.3.2.2 直接蒸发式空调器

如 2.2 节所述，在夏季降温工况时小型直接式空调器采用位式控制方法根据回风温度停开压缩机调节出风温度，一般不作专门的湿度控制，所以也不须安装回风湿度传感器。冬季采用位式控制方法开停加热器和加湿电磁阀用于加热增湿。

对于制冷量较大的活塞式压缩机可在温度下降过程中根据设定值采用卸载的方法调节温度，即接通（或断开）压缩机汽缸缸头电磁阀，使经该汽缸压缩的制冷剂被旁通，因而减少了制冷剂的压缩量，也就减少了压缩机的制冷量。

1.3.3 可编程序控制器控制系统

随着自动控制技术的发展，可编程控制器（PLC）在船舶领域的应用日益广泛。在船舶和海洋钻井平台的空调设备上，西门子公司的 S7 系列 PLC 产品应用已有多年，形成了一批成熟的控制产品和控制系统集成模式。

目前船舶对空调系统的控制要求日趋复杂，因此控制系统的功能日益增多。PLC 既可以替代传统继电控制系统，也具有模拟量采集和控制功能，同时控制逻辑和算法可灵活编程，所以对提升空调设备的控制系统水平十分有效。PLC 控制系统由以下部分组成：控制器部分，包括 CPU 模块、电源模块、模拟量输入/输出模块；人机界面，即触摸屏；传感器部分，包括温湿度、压力压差、电流电压传感器等。一般单台空调器可选用小型 PLC，如西门子 S7-200 系列。对于复杂的中央空调控制系统，可选用集成度更高的中等规模 PLC，如 S7-300 系列。以下以 S7-200 系列产品为例，一些船用空调控制系统常用的 PLC 控制器件见表 6.3-2。

表 6.3-2 船用空调器 PLC 控制系统常用器件

名称	型号	性能参数	厂商
CPU 模块	CPU224	14 输入 10 输出 (继电器型)	西门子
	CPU226	24 输入 16 输出 (继电器型)	西门子
模拟量模块	EM231	4 输入	西门子
	EM235	3 输入 1 出	西门子
电源模块	LOGO! POWER	1.3A、2.5A	西门子
	SITOP	2.5A、5A	西门子
温度传感器	JM608 II	输出 4~20mA 量程可选	天津今明
压力传感器	AKS32	输出 4~20mA 量程 -0.1~2MPa	丹佛斯
电流电压传感器	CE-VJ、IJ、VZ、IZ	输出 4~20mA	深圳圣斯尔

1.4 技术性能

以下介绍部分船用空调器电气控制系统的技术性能供设

计参考。

- (1) 控制参数及精度。
舱室干球温度：27~29℃，±2℃。
舱室相对湿度：40%~50%，±10%。
- (2) 电源。
主回路：3 相交流 380V50Hz，直流 440V。
控制回路：单相交流 220V50Hz；24V50Hz，直流24V。
其他电性能参数见本篇第 1 章 1.3~1.6 节。
- (3) 工作环境。参见本篇第 1 章 1.2 节。
- (4) 远程信号接口。电气控制系统通常须向船舶机舱监控系统提供一副空调器运行开关信号，一副空调器报警开关信号，其他接口信号须视具体设备要求而定。

1.5 主要电气设备和控制元件的选型

设备选型是空调电气控制系统设计的一个重要工作。主要内容包括各种设备电动机的功率确定，电加热器的电制和功率确定，电气元件的参数计算，设备内外部的电缆选择等。

在空调电气设计中，风机和压缩机电动机是随机械配套，所以空调专业设计人员在对机械部件选型后也同时就确定了电动机的功率。因此电气专业人员在确定所需控制的电动机功率时应随时了解空调专业的设计状态，根据已确定的机械装备样本上提供的电动机功率、电制、绕组接线方式确定电控系统主控回路的设计方案。电加热器的功率也是由空调专业人员根据加热负荷和电加热管效率确定的，电气设计人员除了解此功率值外，尚须确定电加热器的接线方式。小功率的电加热器（1kW 以下）可直接采用单相 220V 供电。大功率的可考虑三相 380V 供电，此时应考虑为每相电源平均分配功率以保证三相平衡。采用三相 380V 时，电气设计人员还须考虑每根电加热管的电压参数，如采用星形接法，则每组加热器两端的电压 220V；如采用三角形接法，每组加热器的电压是 380V。

空调电控系统的有关电气元件参数是按照电气控制的一般设计原则计算的，有关方法参照相关专业书籍。船舶设备的电气元件须优先选择具备船检认证的产品，其次考虑经过三防处理的湿热带型产品。目前国内船舶空调设备上常用的一些电气元件见表 6.3-3。

表 6.3-3 船用空调器常用电气元件		
名 称	型 号	厂 商
低压断路器	NSD	施耐德
	CM1	常州开关总厂
接触器、中间继电器 热继电器	LD1, CA2, LR2	施耐德
	3TF, 3UA	西门子
主令开关、指示灯	LA42, AD17	二工
	LA39, AD16	天逸
控制变压器	JBK3-TH 型、BKC-TH 型	上海红旗变压器厂
	CBX 型小型船用变压器	江苏泰州变压器厂
熔断器	RL98 型	苏州保护电器厂
	RL96 型	上海金山电器厂

船用空调电气控制箱内部和外部的电缆电线均选择低烟、无卤、阻燃型。控制箱内部连接电线必须选用 1mm² 以

上的船用软电线；外部设备电缆可选用乙丙绝缘交联聚烯烃内套裸钢丝编制铠装舰船用电力、控制电缆，如 JEPJ90/NC、JEKPI90/SC 型等。

2 船舶冷藏装置的电气控制

2.1 主要控制功能

船舶冷藏装置主要应用于冷藏船（冷藏货舱）和伙食冷库。这两种应用场合的冷藏装置除使用的制冷介质与换热方式有所不同外，控制对象和方式是基本相似的。本节主要以应用更为普遍的伙食冷库为例说明船用冷藏装置的基本控制原理。

船舶冷藏系统主要由库房、水冷式压缩-冷凝机组、冷风机、控制系统组成。其中水冷式-压缩冷凝机组包括制冷压缩机、海水冷凝器以及膨胀阀等制冷阀件及管系等设备。其中需要电气控制的是压缩机的起停卸载、供液电磁阀、滑油加热器以及冷却水泵的起停以及制冷系统联锁保护。冷风机是冷藏装置产生制冷效果的热交换设备，目前除部分旧型船舶外，大多数船舶无论高温库还是低温库都采取吹风冷却的方式，因此都配置了高、低温冷风机。冷风机须起停控制和过载保护，另外对于低温冷风机内的融霜加热器还需要按时间周期开停控制。冷库的库房内应均匀布设库温传感器。典型的船用冷藏装置控制系统图如图 6.3-10 所示。

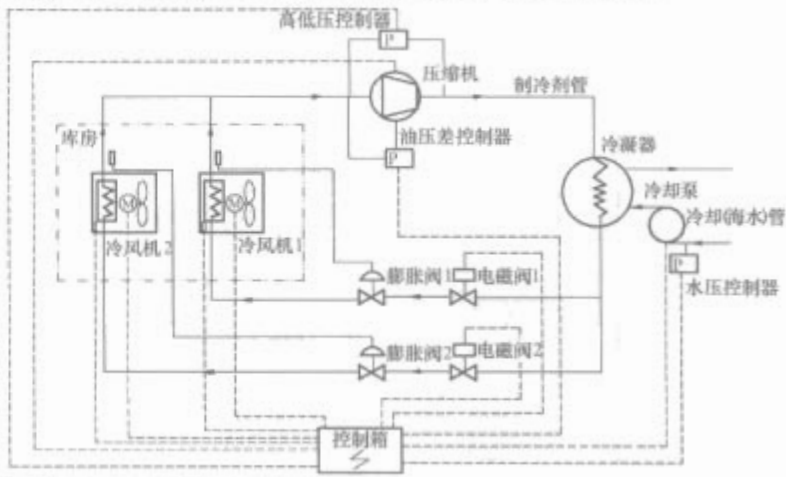


图 6.3-10 船用冷藏装置控制系统图

2.2 船舶冷藏装置的分类及其控制系统的工作原理及特性

船舶冷藏装置按制冷系统的结构可分为一机一库、一机多库和多机多库。以下分别介绍这几种冷藏装置的控制原理和特点。

2.2.1 一机一库

所谓一机一库是指一个压缩机组向一个库房的冷风机输送制冷剂以维持制冷循环的冷藏装置。这是最简单的冷藏机组结构型式。其控制系统的功能和工作过程是其他冷藏装置的基础。

一机一库冷藏装置的一般控制过程如下：当库温高于设定值的上限，供液电磁阀打开向库房内的冷风机供液，然后冷风机启动。由于换热的效果，冷风机蒸发器中制冷剂蒸发压力上升，当该压力到达低压控制器设定的上限，压缩机启动。随着机组的运转库温下降，当库温下降至小于库温控制器设定的下限，供液电磁阀关闭，冷风机停机。由于供液停止，压缩机继续运转抽气，蒸发器中的剩余制冷剂得以完全蒸发，当压力下降到低压控制器的下限，压缩机停机。除上述库温的控制过程外，电控装置在压缩机停机间歇须向滑油

加热器（曲轴箱加热器）供电用以加热润滑油使溶解在内的制冷剂液体蒸发。另外对于低温冷风机（库温在零度以下）的融霜加热器，电控装置须设置时间控制器使其按设定周期工作。融霜时制冷机组和冷风机停止运行。

2.2.2 一机多库

一机多库冷藏装置最典型的是一机两库，即一个压缩机组为一个高温库和一个低温库分别输送制冷剂。在一机多库的系统中，每个库的冷风机控制方法同一机一库系统，但由于所控制的两个库温不同，压缩机的控制逻辑必须是两个库温均达到温度控制器的下限，供液电磁阀关闭，压缩机才进行抽气直至回气压力低于低压控制器的下限停机。当其中一个库温上升到温控器的上限，冷风机起动和电磁阀打开，回气压力回升至上限压缩机起动。BHL-4.8 型船用食品冷藏装置的电气控制原理图如图 6.3-11 所示。

2.2.3 多机多库

在某些库容较大的伙食冷库中，在进货时须快速冷冻食品，因此这种型式的冷藏装置可能会选择两台以上的压缩机在快速制冷工况时共同运行，而在达到库温时采用一台压缩机维持运行。这种控制方式可以采取为两台压缩机设置不同的开机温度或压力来实现。这样一台压缩机处于长期使用状态，而另一台处于备机状态。这种系统型式实际上也是一种提高冷藏装置可靠性的冗余设计。

在多机多库系统中，每个库中会布置多台冷风机，每台

冷风机和供液电磁阀受各自的回风或出风温度传感器控制开闭，因此有可能产生一个现象：当大部分冷风机处于停机状态，只有少量小制冷量的低温冷风机（如鱼库的冷风机）在运行时，压缩机的回气压力有可能处于负压。为避免这种工况的出现，电控系统应设计“拌打”逻辑，即当某台小制冷量冷风机单独运行时，另外一台大制冷量冷风机的电磁阀即时开启并起动以平衡制冷管系中的压力。

对制冷量较大的系统，一般会配置专用的冷却水系统。因此冷藏装置的电控线路中应包含冷却水泵供电和控制联锁功能。主要的联锁关系是压缩机和水泵联锁，冷却水管系上的水压开关与压缩机联锁。

2.3 船舶冷藏装置的电气控制技术

2.3.1 冷风机电机起动控制

根据风量的大小，冷风机配置单相异步电动机和三相异步电动机。单相异步电动机起动线路可参照本章 1.3.1 节所述空调风机起动控制的内容。冷风机配置的三相电动机一般是小功率电动机（小于 1kW），可采取直接起动的方式。冷风机电机一般内置热保护器用以过载保护。电控原理参考本章 1.3.1 节内容。

2.3.2 压缩机电动机起动控制

船用伙食冷藏装置的压缩机一般也属小功率电动机，可采取直接起动的控制方式。如上所述，冷藏装置的压缩机起

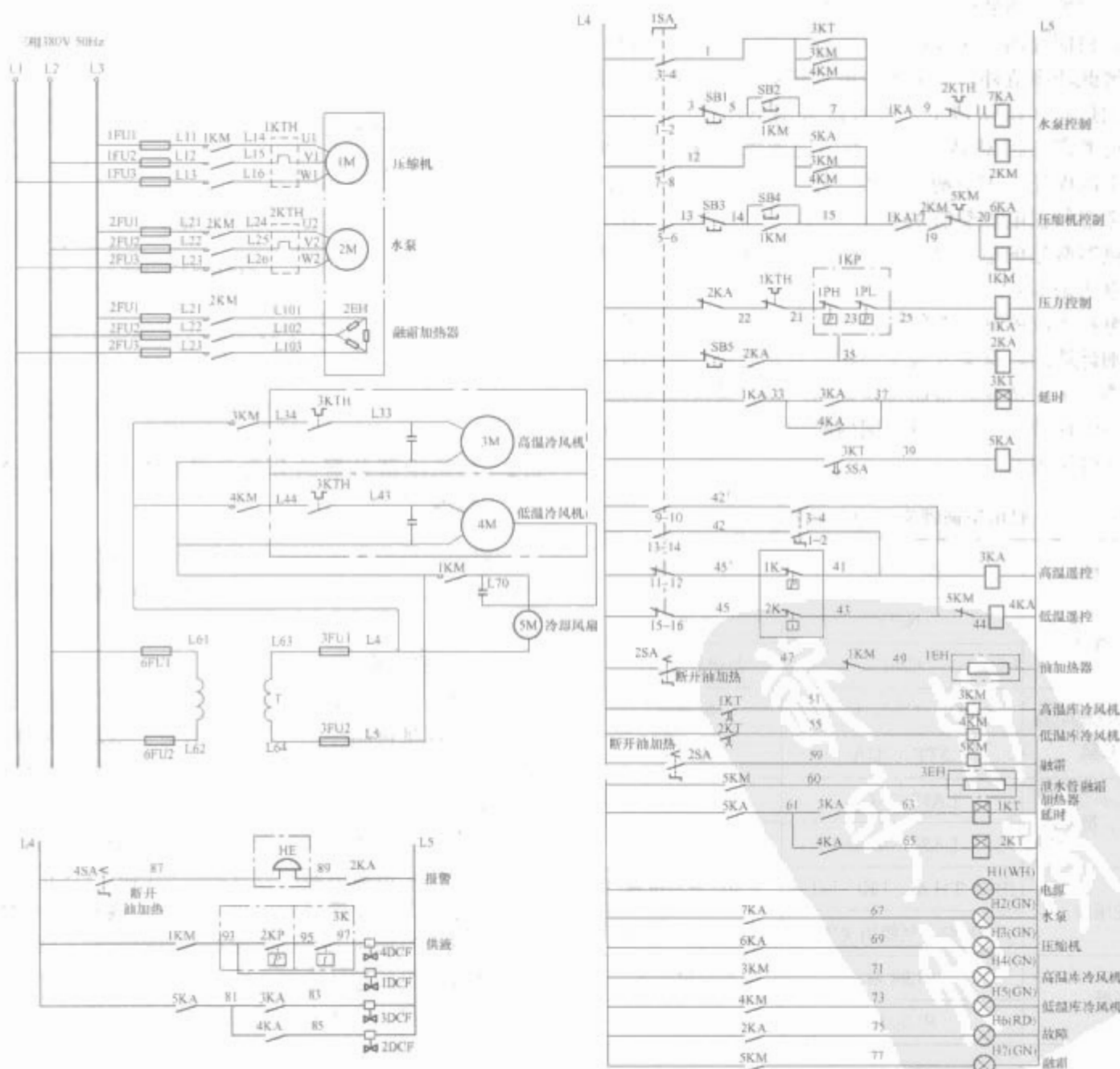


图 6.3-11 BHL-4.8 型食品冷藏装置电气控制原理图

停受低压控制器并且与高压控制器、油压控制器、冷却水压控制器连锁，线路中必须设置热继电器过载保护。

在库温达到后，制冷管系电磁阀关闭后压缩机仍须运行抽气直至吸气压力达到下限设定值停机。这个过程即所谓的抽气控制。这是冷藏装置与其他制冷设备不同的控制方式，主要由于冷藏装置的蒸发温度低，压缩机的回气口会积存较多的液态制冷剂，通过抽气使回气管内的液体充分蒸发，可防止压缩机再次启动时引起“液击”损伤吸气阀片。

2.3.3 伙食冷库温度控制方式

如前所述，伙食冷库的温度控制是针对冷风机的，而压缩机起停是由低压控制器控制的。其具体的控制逻辑可参照 2.2 节的内容。但对于某些制冷系统，停机后压缩机吸气端压力和排气端压力会在较短的时间内平衡，低压快速上升至上限，压缩机启动。而此时库温并没有上升至冷风机开机温度，电磁阀也没有开启，因此压缩机又将回气管中的压力迅速抽吸至停机压力。如此循环往复造成压缩机短时间内频繁起停。为避免此现象可采取上节实例 BHL-4.8 型冷藏装置中的方法使冷风机的运行信号和启动压缩机的接触器连锁的做法，这样冷风机不开，即使压力到达上限压缩机也不启动。

2.3.4 可编程控制器的应用

船用伙食冷库的控制逻辑较简单，目前多数采用常规仪表和继电器控制相结合的设备组成方式。在少数多机多库的系统中由于控制点多，逻辑相对复杂，也已经有应用西门子 S7-300 型 PLC 的工程实例。有关 PLC 系统设计中的具体选型可参考西门子公司的相关产品资料。

2.3.5 控制参数及精度

船舶常用冷库温度控制参数见表 6.3-4。

表 6.3-4 船舶常用冷库温度参数

库名	远洋轮		沿海轮	
	温度(℃)	相对湿度(%)	温度(℃)	相对湿度(%)
肉库	-8~-12	80~85	-5~-8	80~85
鱼库	-8~-12	85~90	-5~-8	85~90
乳品	+2	75~80	+2	75~80
蔬菜	+5	80~90	+5	80~90
粮食	10~15	<75	—	—

3 船舶冷水机组的电气控制

3.1 主要控制功能

船舶冷水机组是当前大中型船舶空调系统的主要冷源。虽然各种空调用冷水机组的压缩机型式、台数以及制冷管系不尽相同，但是其基本的组成部分是一个单级压缩制冷循环系统。构成一个单级制冷系统的要素是以下四个部分：压缩机、冷凝器、节流装置、蒸发器。因此这些也就是电气控制系统的主要控制对象。其中控制功能比较复杂的是压缩机，需要进行起停和能量调节控制。目前船用冷水机组的冷凝器一般是海水冷却型的，所以输送冷却水的水泵须作起停和连锁控制，同样输送冷媒水至蒸发器进行热交换的冷媒水泵也须作同样的控制。一般机械式节流装置无须作电气控制。对于某些螺杆式和离心式冷水机组的因具有独立的油泵，所以也须对其电动机进行电气控制。另外同所有的制冷压缩控制系统一样，冷水机组应具有高低压保护、油压差保护、水流量保护、水压（压差）保护以及电动机过载保护等必要的保

护功能。冷水机组的控制系统图如图 6.3-12 所示。

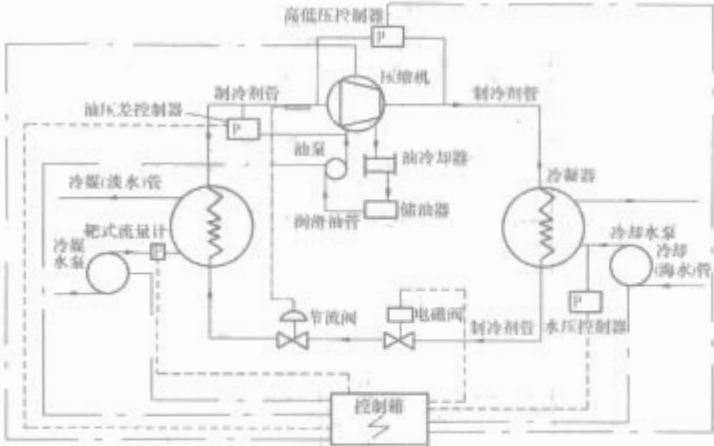


图 6.3-12 船用冷水机组控制系统图

3.2 船舶冷水机组分类及其控制系统的工作原理和特性

船用冷水机组按其压缩机的型式可分为活塞式冷水机组、螺杆式冷水机组、离心式冷水机组。如上节所述每一种冷水机组的系统构成是基本相同的，主要区别在于压缩机的工作原理不同，因此每一种冷水机组控制系统的区别就在于压缩机的控制方式。

3.2.1 活塞式冷水机组

在船用领域，活塞式制冷压缩机的应用是最为普遍的。主要的原因是这种压缩机适用的是制冷量在 350kW 以下的中小规格制冷系统，而这个制冷量范围几乎可以覆盖船舶上所有的应用。因此活塞式冷水机组也是各种船舶上最为常见的型式。此外从控制系统来看也是最为简单的。以下以图 6.3-13 所示的 ZBL-45 型冷水机组为例，简要介绍活塞式冷水机组的电控原理。从图中可以看出其主回路中有四台电动机，分别是冷媒水泵、冷却水泵、两台压缩机。采用两台压缩机是可通过控制压缩机的运行台数进行制冷能量调节，这是活塞式冷水机组常用的能量调节手段。从控制回路看，该型冷水机组采用了手动、自动两种控制方式。其中自动控制方式中采用了 PLC 控制器。每一个接触器或卸载电磁阀、滑油加热器等设备都由手动、自动两个并联电路控制，两个电路由继电器触点切换，该继电器受控制方式选择按钮控制。这种控制形式可以使设备的操作电路分为完全冗余的两部分，这是为了适应船舶应用的特殊性而作的可靠性设计。

从自动回路看，PLC 控制器采集了机组的各种参数，通过各个开关量输出通道（DO）控制各个设备，所有的控制逻辑和连锁保护程序实现；手动控制回路是典型的电动机启动控制回路，同时串联了防冻开关、高低压控制器、电机保护器等触点进行连锁保护，可见在应急情况下冷水机组通过人工控制也可满足基本使用功能。

该型冷水机组的自动能量调节由 PLC 判断冷媒水出水温度与设定值的差距，接通或断开位于汽缸上的卸载电磁阀，改变压缩机的制冷剂流量和排出压力实现的。该机组每个压缩机设有一个卸载电磁阀，配合压缩机的运行台数控制，整个机组具有 25%，50%，75%，100% 四个能量挡次。如图 6.3-13 所示每个卸载电磁阀还可以通过一个主令开关进行手动控制。在压缩机启动过程中卸载电磁阀总是处于接通状态（卸载），这种启动方法可减小压缩机启动电流和机械磨损。该机组其他的重要连锁保护主要是所有水泵须与压缩机连锁，任一水泵停，压缩机即停机。

3.2.2 螺杆式冷水组

螺杆式压缩机具有运行稳定、且使用寿命较长的特

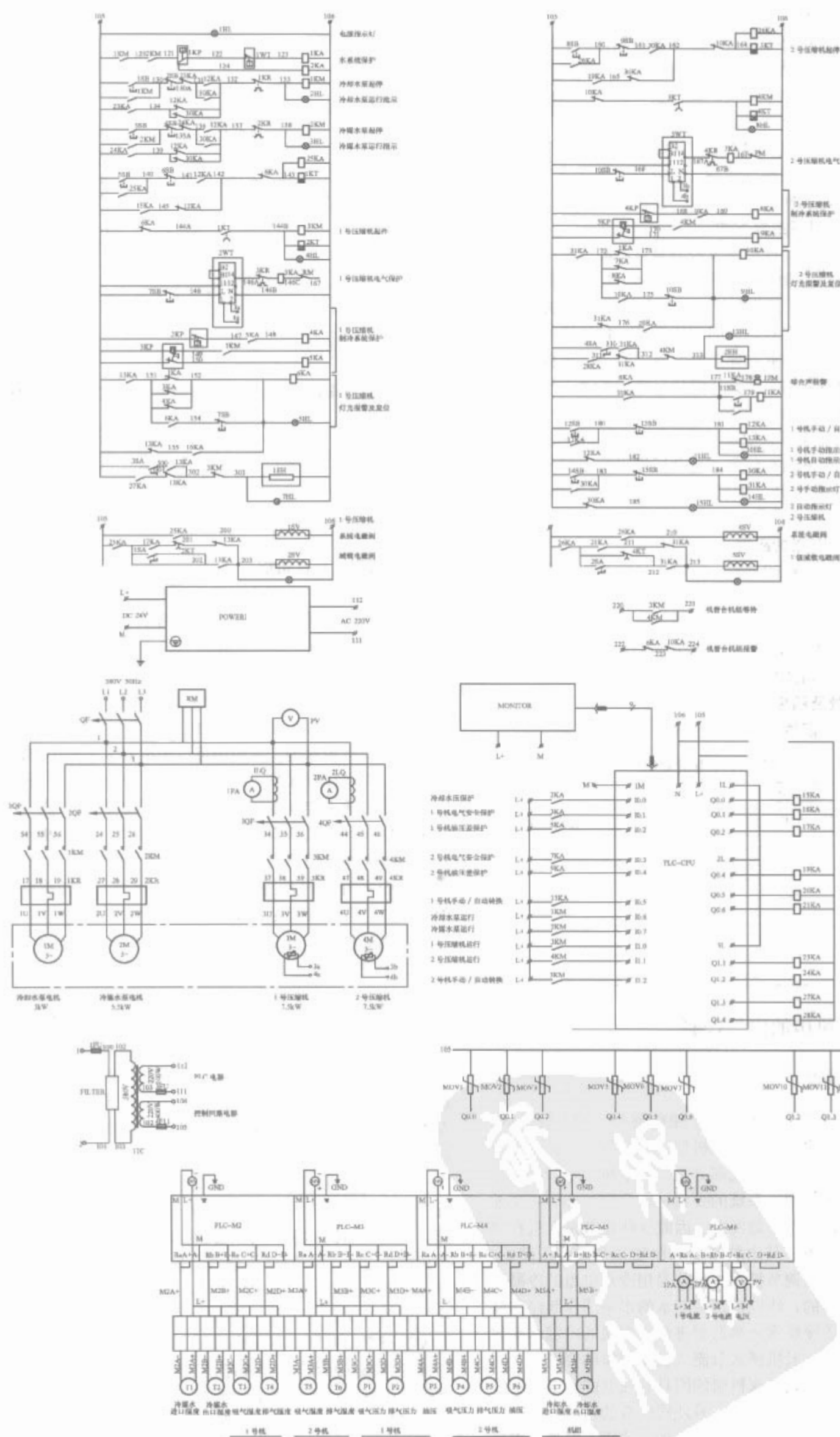


图 6.3-13 ZBLS-45 型活塞式冷水机组电气原理

点。近年来无论在陆上建筑领域还是船舶领域采用该种冷水机组日渐流行。而且螺杆式冷水机组的制冷量范围远远大于活塞式冷水机组,可达70~1750kW,其适用的范围因此较大。螺杆式压缩机又分为有油和无油螺杆两种,其区别在于有油螺杆压缩机具有专用的润滑油循环泵,这种型式较为传统且控制系统相对复杂,在国外逐渐为新型的无油螺杆所替代。但目前国内船舶上使用仍较为普遍。以下以BLK-300型半封闭螺杆式冷水机组为例介绍螺杆式冷水机组的控制原理。

从主回路看,同ZBLS-45型活塞式冷水机组相同,也是分别连接了冷媒水泵、冷却水泵和压缩机电机。所增加的是油泵电机。由于螺杆式压缩机的功率较大(90kW),因此采用了星—三角降压启动方式。

从控制回路看,该型冷水机组采取了与ZBLS-45型活塞式压缩机同样的手动、自动两种控制线路。自动控制也采用了PLC控制器。所不同的是手动、自动电路的切换是由一个多级转换开关直接控制的。图6.3-14中螺杆式冷水机组的一般联锁保护与活塞式相同,增加了一个重要的联锁—

油泵和压缩机联锁。不仅是油泵开压缩机才开,而且压缩机停油泵也须停止,否则在压缩机停机之后如油泵仍将大量润滑油喷入且无法分离出来,再次开机时容易造成缺油故障。

螺杆式冷水机组的能量调节方式有两种:无级和有级。螺杆式压缩机的能量调节原理是增大或减小进入压缩机螺杆的制冷剂流量。无级调节是通过一个液压控制的滑阀前后移动来连续地改变旁通口的大小,从而改变制冷剂被旁通回吸气口的量来实现能量调节的。有级调节压缩机的制冷剂可通过多个旁通管流回吸气口,而每个旁通管上有一个电磁阀控制通断从而可调节制冷剂的旁通量。可见螺杆式压缩机的有级调节可采用类似于活塞式压缩机通断卸载电磁阀的方式来控制。螺杆式压缩机在启动时须处于卸载状态;在运行期间可根据冷媒水出水温度与设定值的差值决定机组能量调节的状态。

3.2.3 离心式冷水机组

离心式制冷压缩机是一种速度型制冷机,其容量要远远大于活塞式和螺杆式等容积式压缩机,因此通常被用于大容

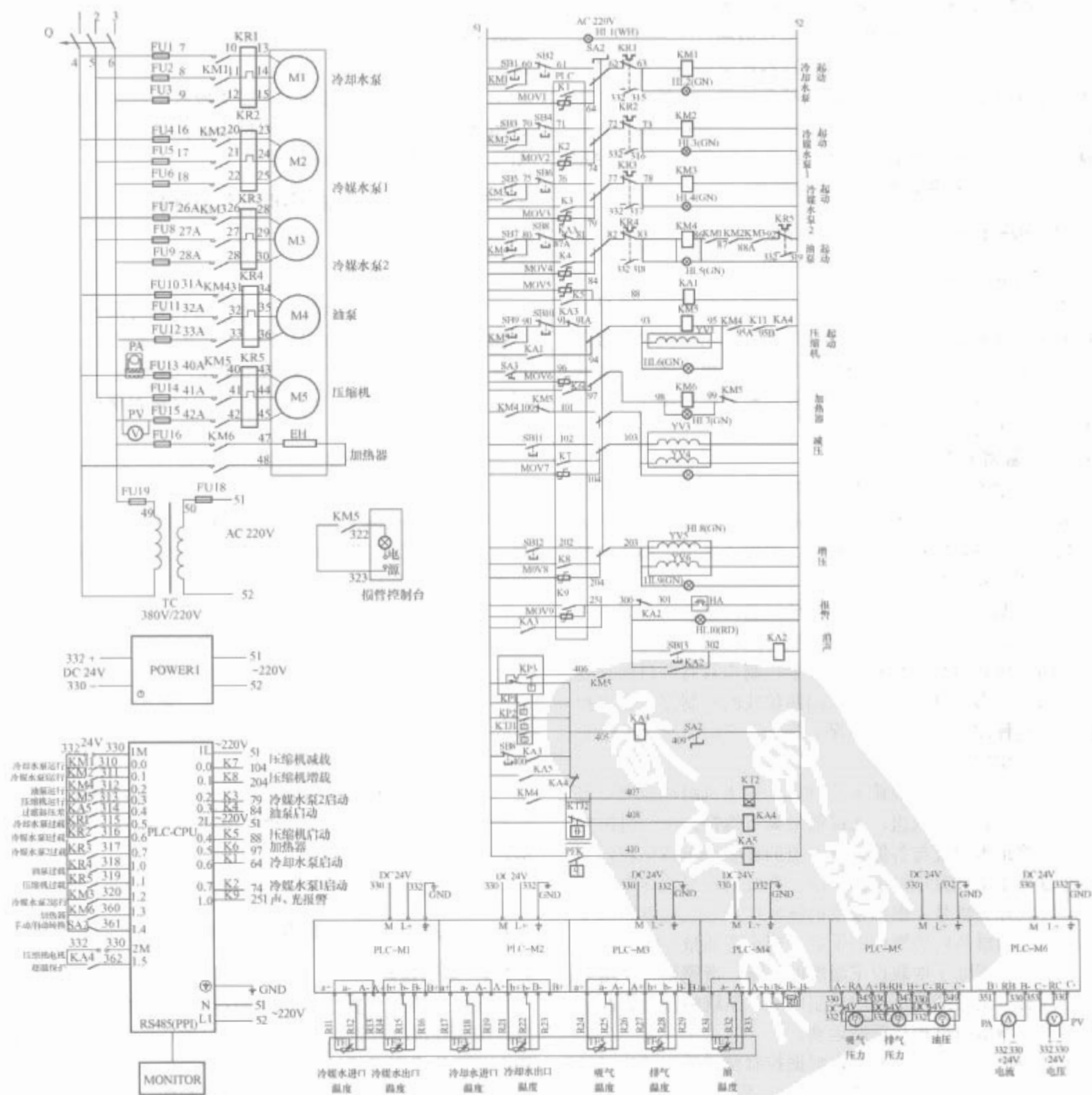


图 6.3-14 BLK-60A 型半封闭螺杆式冷水机组电气原理图

量的空调系统。目前国内船舶应用离心式冷水机组的实例较少,但随着国内造船事业的发展,这种冷水机组将在一些大型船舶的空调系统中占据主流地位。在此简单地介绍离心式冷水机组的控制系统供相关的船舶设计人员参考。

离心式冷水机组的主回路包括冷媒水泵、冷却水泵、油泵和压缩机电动机。各种泵的起动方式视各自电动机的容量而定。离心式冷水机组的压缩机通常采用大容量笼型三相异步电动机,所以通常应采取降压起动方式。同时应考虑在起动时关闭导叶使压缩机处于卸载状态以限制起动电流。

离心式冷水机组的能量调节是通过改变进气导叶的角度来调节制冷剂流量实现的。在机组起动完成后,离心式冷水机组在一段时间内须限制导叶的打开速度,以避免急速增加压缩机的负载。这种加载方式是专门针对离心式冷水机组的,可防止以下情况的出现:电动机超载、制冷剂超低温、电动机绕组超高、压缩机喘振和冷凝器高压。

在机组正常运行后,离心式冷水机组是根据出水温度和压缩机压力参数来调节导叶的开度。在目前许多成熟的离心机组上,通常还会采用专用的变频装置(Variable Speed Drivers,简称VSD)调节压缩机转速和导叶调整相结合的方式进行能量调节,这可以在低负荷时使机组保持最佳效率。

离心式冷水机组除具有与其他冷水机组相同的制冷系统和电气系统联锁保护外,还应防止喘振过度。一般在产生了喘振报警状态,控制系统将首先限制或关闭导叶开度,然后起动停机程序。由于离心式冷水机组的控制逻辑远较其他型式复杂,因此都采用PLC进行自动控制。

3.3 船舶冷水机组的电气控制技术

3.3.1 电动机控制方式

正如上述两节的介绍,船用冷水机组电控系统中各种电机都采用三相异步电动机,其起动控制可采用常规的直接起动、降压起动方式,具体线路设计参照本篇第1章3.1节介绍。有些离心式冷水机组采用变频装置控制电机转速,在起动时可得到更好的起动性能。

3.3.2 能量调节方式

对于各型冷水机组,大能量机组可以采取由多台小容量压缩机组合的方式,在不同的出水温度设定点控制压缩机运行台数以取得多级能量调节的效果。而对于各型压缩机自身的调节方式简要介绍如下。

(1) 活塞式冷水机组。活塞式压缩机的能量调节方式一般属于有级调节,通过开停压缩机和开关卸载电磁阀的方式形成机组多级制冷量的控制。每一个控制点具有各自的温度设定值与出水温度进行比较,采用两位式的控制方式输出控制信号。这种控制方式可基本保证冷水机组的出水温度稳定在要求的范围内。

螺杆式冷水机组有级调节的螺杆式冷水机组能量调节方式类似于活塞式冷水机组。无级能量调节螺杆式冷水机组的控制系统将出水温度与各能量调节点的温度设定值比较:当出水温度高于增载设定温度的上限,系统向一组增载电磁阀输出脉冲式开关信号,根据预设的脉冲信号占空比电磁阀交替开关,能调滑阀内的滑块向增载(减小旁通量)的方向运动;当出水温度低于增载设定温度的下限,滑阀则停止增载运动。当出水温度降低至减载控制区域,系统将输出脉冲信号使滑阀作与增载过程相反的运动。

无级调节的增减载控制可以根据控制精度采用两位式控制,这时脉冲信号的占空比是固定的。另外也可以采取PI控制和PWM调制技术相结合的控制方式,根据出水温度与

设定值偏差的大小调节增减载信号的占空比以取得更高的温度控制精度。

(2) 离心式冷水机组。如上述介绍,离心式冷水机组通过调节导叶开度进行能量调节。导叶是由电动执行机构驱动的。根据设定值和出水温度的实际值之间的偏差,控制器输出信号对导叶执行机构进行PI连续控制。根据不同的控制精度可为执行机构设置一定信号范围的动作死区,避免导叶动作频繁。这个信号区域称作静止带。当控制信号超出静止带,则进入了导叶开度按温度偏差大小成比例开关的区域,就是所谓的比例带。需要指出的是在对导叶进行比例控制的同时须随时对压缩机的压力参数和压缩机转速进行监测,避免使压缩机进入喘振过度的状态。

3.3.3 控制参数及精度

冷媒水出水温度: $5\sim 8^{\circ}\text{C}$, $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

3.3.4 可编程序控制器的应用

目前国内的许多船用活塞式和螺杆式冷水机组已普遍采用西门子公司S7-200系列可编程序控制器。其模块和传感器的选型可参照本章1.3.3节内容。对于控制功能较为复杂的离心式冷水机组,在船舶应用时可采用压缩机厂家提供的专用微控制器或采用S7-300系列PLC控制器作为主控制器。

3.3.5 远程信号接口

电气控制系统通常须向船舶机舱监控系统提供一副冷水机组运行开关信号,一副冷水机组报警开关信号,其他接口信号须视具体设备要求而定。

4 船舶海水淡化装置的电气控制

4.1 主要控制功能

海水淡化也称海水脱盐。海水淡化是将海水加热蒸发,并使蒸汽冷却得到淡水的过程。常见的有蒸馏法,其特点是不受水中含盐的限制,所产淡水水质纯度较高;可以充分利用废热水或低品质蒸汽的场合,因而设备容量可做得很大;可不预处理直接由海水提供。

海水淡化的控制系统主要控制对象(以炉水蒸发装置为例)大致如下:

海水泵(也称工作水泵)有两个作用:①利用海水冷凝,把加热蒸发的汽水冷凝成淡水;②与装置系统部件——盐水空气抽除器相配对维持腔体较高的真空度。

4.1.1 循环水泵

循环水泵使管路中流动的淡水构成循环系统。管路中的淡水为介质,蒸汽作为引射介质,加热蒸汽与淡水在混合管内混合(称之为混合式喷射加热器),使之升温作为蒸发海水的热源。

4.1.2 凝水泵

凝水泵把冷凝器生成的淡水从冷凝板组内抽出,由给水质检测仪检测,把合格的水输送至有用的地方,如锅炉的补给水等。

海水淡化装置系统图见图6.3-15。

4.2 船舶海水淡化装置的电气控制技术

4.2.1 水泵控制

在海水淡化装置中各水泵的运行都为各自独立的水系统,因而在电气控制上相对简化。目前船舶海水淡化装置上最大的工作水泵不超过22kW,在电气电力负荷允许下各泵一般都直接起停,在主回路上选用相配的空气断路器和热过载加以保护。

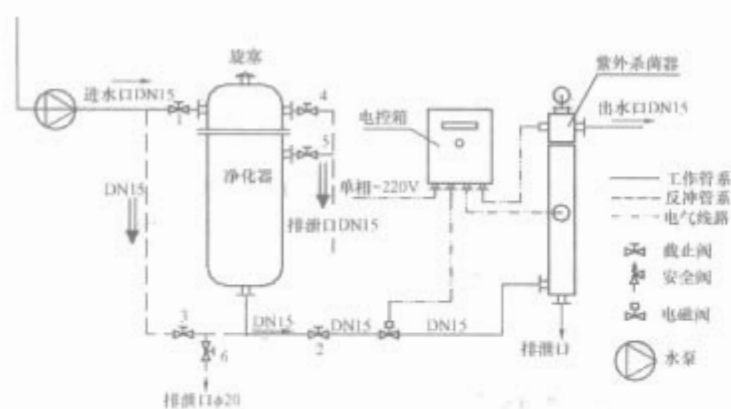


图 6.3-15 海水淡化装置系统图

在海水淡化装置电气控制上，各泵都有它各自的功能，起停也有它基本的操作时序，一般如下：

(1) 开机：起动海水泵，当腔体内压力达到一定负压——起动循环泵，开启蒸汽阀或热水阀——开启凝水泵，监测水质。

(2) 关机：关蒸汽阀或热水阀——关凝水泵，盐度计——延时 10min（设蒸发温度）关凝水泵，循环泵。

4.2.2 蒸发流量控制

按插在蒸发器进口管道中的铂热电阻信号检测后，通过智能温度控制器，与给定值比较后，经过仪表 PID 控制输出 4~20mA 标准信号，直接操作蒸汽管路中的电动调节阀开关，调节蒸汽的流量，以达到设定值。控制框图见图 6.3-16。



图 6.3-16 海水淡化装置蒸发流量控制框图

4.2.3 盐度计的淡水水质检测

盐度计应用导电原理，通过电极传感器测量水中含盐量的大小。

按插在凝水泵出口处的电极传感器，当水质超过要求的标准水质值时，盐度计表内一副报警触点输出，接通中间继电器的电路，中间继电器触点接通打开不合格水电磁阀，将水排放船舶外，并声光报警。

4.2.4 饮水处理光照强度仪的控制

紫外灯光照的强弱由日盲管接收信号传输在光照强度仪仪表上。当紫外灯良好或石英玻璃管干净透光度高时，淡水在石英管周围自下进入流向上面出口，紫外线孔会杀死水中的细菌。一旦紫外灯熄灭或石英玻璃管污染严重，阻碍紫外线探头的测量，光照强度仪表就会发出警报，电磁阀就会切断进口水源。

4.2.5 技术性能

(1) 显示水质的常用单位有三种，电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)，电阻率 ($\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$) 及 TDS ($\times 10^{-6}$)，目前在船舶海水淡化装置上如主锅炉给水用 HS-55 炉火蒸发装置，水质纯度应基本稳定在 $<6 \times 10^{-6}$ ；辅锅炉用板式蒸馏装置 SWH-20 应 $<80 \times 10^{-6}$ 。而水质控制的精度取决于对各种盐度传感器参数的正确整定。如以美国大湖公司生产的 GLI-53 型盐度计为例，使用该传感器时必须输入该传感器经 GLI 认证的池常数值以及温度 T 因子，这些值对于每一个传感器都是独一无二的。也就是说，首先设置它的测量范围与传感器的池常数本身范围相匹配。其次温度参数对电导率的测量精度影响较大；RTD 元件本身的电阻值的细微变化也会影响传感器的精度，因而必须获取正确的传感器 T 因子值。

(2) 蒸汽调节阀开度信号来自温度控制信号，而其蒸发温度控制精度又反映在控制仪表的 PID 参数上。当一次感温信号传输到温度控制器后，如 PID 参数设置不当，会引起当前温度升降幅度，由此引起调节阀开启、关闭频繁，也就是振荡，同时也会引起汽水混合喷射器噪声的增大。所以确定的合理地调控 PID 值，使得调节阀能根据蒸发温度当前值每变化 1°C ，阀门能平稳，等比地渐开渐关，这就是我们理想的控制精度。在 HS-55 炉水蒸发装置上电动调节阀的精度在正负 1% 左右。

(3) 根据饮水处理装置工作原理，只要紫外灯管发光，日盲管接受紫外光线的光照信号，经放大驱动外部中间继电器打开水流电磁阀，循环水质就接受光线杀菌。光照的强弱反映在直流“mA”表上。经检测，一般控制电流表满度的 30% 就基本都杀死水中的细菌。低于满度 30% 装置就会发出声光报警，停止水源流动。需要说明的事，装置发出报警并不一定坏，而是接受紫外线光照的某一部分效果不理想，如紫外灯管老化，长期不用，石英玻璃管外壁生成污垢等。在饮水处理装置上，对紫外线强度的控制精度要求不是很高。因在日常水流动情况下，石英管不断收到洗刷，紫外灯管发出的热量也不断地被水带走，有利长期工作。

(4) 电源。

主回路：三相、交流、380V、50Hz。

控制回路：单相、交流、220V、50Hz，24V、50Hz，直流、24V。

其他电性能参数见本篇第 1 章 1.3~1.6 节。

4.2.6 工作环境

参照本篇第 1 章 1.2 节。

5 船舶辅锅炉的电气控制

5.1 主要控制功能

船舶辅锅炉电气控制系统的控制功能包括对燃油辅锅炉的燃烧控制、锅炉给水控制以及安全保护与警报等环节。

5.1.1 燃油辅锅炉的燃烧控制

燃油辅锅炉的燃烧控制系统包括对锅炉燃烧器起动时的顺序控制以及根据锅炉蒸汽压力变化或热水温度变化而实行的大火、小火，停止的燃烧器出力三位控制或大火、中火、小火、停止的燃烧器出力四位控制以及燃烧器出力的比例式调节。以燃烧器出力的三位式控制为例，其起动顺序如下：

风门复位→风机起动→大风门扫气→小火门→电火花点火→1#油头喷油→小火燃烧→大火燃烧(2#油头喷油，风门开大)→小火燃烧(2#油头停止，风门关小)→后扫气→停炉。

5.1.2 船舶辅锅炉的给水控制

船舶辅锅炉一般设置 2 台给水泵，一台运行，一台备用，可交换选择。对于额定蒸发量 $1\text{t}/\text{h}$ 以下，设计压力不超过 0.78MPa 的小型辅锅炉可只设一台给水泵。

船舶辅锅炉一般设置 5 只水位传感器，包括高水位、控制水位上限（给水泵停止位）、基准水位（零水位）、控制水位下限（给水泵起动位）、低水位（备用泵起动）、过低水位（切断燃烧，声光报警）。

小型辅锅炉可不设置高水位传感器，低水位和过低水位可设定在同一水位高度。

5.1.3 安全保护与报警

安全保护与报警是控制系统的主要环节，是无人照管的全自动船舶辅锅炉必不可少的内容，一般包括：高水位报警、低水位保护与报警、过低水位保护与报警、蒸汽高压、

燃烧器马达过载、燃烧器未到位、火焰故障、空气失电压保护与报警以及失电保护等环节。

5.2 船舶辅锅炉分类及其控制系统的工作原理特性

(1) 船舶辅锅炉按不同的分类方法其类型也有所不同。按照 GB 3463-1992《船用辅锅炉型号编制方法》之标准,其分类包括水管辅锅炉、烟管辅锅炉、废气锅炉、燃油废气组合式锅炉、强制循环辅锅炉等几大类。如按载热体介质来分可包括蒸汽锅炉、热水锅炉、热油锅炉等,如按水循环性质来分有自然循环辅锅炉和强制循环辅锅炉之分。若从辅锅炉控制系统的工作原理及特性来分析,船舶辅锅炉应按能源分类即燃油辅锅炉、废气锅炉、燃油废气组合式辅锅炉来区别。

(2) 对于燃油辅锅炉和燃油废气组合式锅炉来说,燃烧器是其主要的组成部分。因此燃烧控制就是锅炉控制系统的重要组成部分,目前燃烧控制多选用专用的燃烧控制组件,如 Weishaupe 燃烧器的燃烧控制器为 LAL2.25 系列, baltur 燃烧器的燃烧控制器为 LOA21 系列等。燃烧系统除自动控制外,同时配有手动控制环节并可进行自动或手动燃烧控制可实行自动/手动切换。

该燃烧控制系统包括前已述及的燃烧顺序控制以及根据蒸汽压力或锅炉水温度变化而进行的蒸汽压力或热水温度控制,即燃烧负荷(即大、小火或大、中、小火停止)控制。

除燃烧控制外,给水控制系统也是船舶辅锅炉的主要组成部分。前已述及,根据船舶辅锅炉的类型及容量大小,分别设置几个水位传感器,以便进行给水控制及高低水位保护与报警。

5.3 船舶辅锅炉的电气控制技术

5.3.1 燃油辅锅炉的燃烧控制及蒸汽压力或热水温度控制

配有燃烧器的燃油辅锅炉或燃油废气组合式锅炉等燃烧自动控制包括前面 5.1.1 述及的燃烧器启动时的顺序控制以及根据蒸汽锅炉蒸汽压力或热水锅炉的热水温度信号进行燃烧器负荷即燃烧器出力控制,包括大火(全负荷)、中火(如果设有的话,也叫中间负荷)、小火(部分负荷也叫低负荷),停炉等四种工况。

燃烧器控制中燃烧器启动时的顺序控制及蒸汽压力或热水温度控制是通过燃烧器及燃烧器上的伺服马达以及蒸汽压力控制器或热水温度控制器来实现自动控制的。除自动控制外,系统中还设置了“手动控制”环节,通过操作燃烧控制转换开关来实现手动燃烧顺序控制及按“蒸汽压力”或“热水温度”指示进行的大、小火负荷调节。

5.3.2 船舶辅锅炉给水控制

(1) 船舶辅锅炉的给水控制如前面 5.1.2 所述,通过设置几个水位传感器来进行位式给水及高、低、过低水位保护与报警。

(2) 对于少量较大型,控制要求高的船舶辅锅炉采用连续给水控制系统。常用的连续给水控制系统多为自动调节的气动连续给水控制系统,系统中设置 2 台给水泵,由给水泵选择开关选择。给水泵为长期连续运行工作制,只有当锅炉出现高水位或热井出现低水位时给水泵才停止运行。一旦水位恢复正常,给水泵自动启动。当锅炉出现低水位时,给水泵自动切换,运行泵自动停止备用泵自动启动。

锅炉水位的自动调节功能由电容式差压变送器(STD)、数字指示调节仪(SDC)及气动给水调节阀(AGVB)等仪表器件来完成。

电容式差压变送器(STD)将锅炉水位的变化变换成 4~20mA 标准电流信号,通过配电器将该电流信号输入至

数字指示调节仪(SDC),调节仪再将该电流信号输出至气动给水调节阀(AGVB),根据电流信号的大小调节阀门的开度,从而控制向锅炉给水的流量,以保证锅炉水位始终保持在基准水位上下。

数字指示调节仪(SDC)除调节向锅炉给水的流量外,还设置了高水位、低水位、过低水位三副常开报警触点,当发生给水故障时可用于安全保护与报警。

5.4 船舶辅锅炉控制系统的技术性能

5.4.1 控制参数精度

蒸汽压力控制:按技术规格书要求,一般精度为 0.01MPa。

热水或燃烧温度控制:按技术规格书要求,一般精度为 0.1℃。

5.4.2 电源

主回路:三相、50Hz、380V。

控制回路:单相、50Hz、220V。

5.4.3 工作环境

按技术规格书要求或《钢质海船入级建造规范》及 GJB 4000-2000《舰船通用规范》规定的要求。

5.4.4 适用燃料范围

(1) 轻柴油。

(2) 重油。

5.4.5 远程信号接口

从电控箱输出至集控台或损管台“燃烧器运行指示”无源常开触点及“综合故障报警”无源常闭触点。如有其他接口,按技术规格书规定。

5.5 主要电气设备和控制元件的选型

5.5.1 主要电气设备的选型

与船舶辅锅炉配套的主要电气设备有给水泵、燃烧器(包括鼓风机、油泵),对于燃烧油的辅锅炉还包括燃油运输泵(供油泵)及电加热器,由锅炉本体设计人员为主,电气控制设计人员配合,根据技术规格书及相关规范、标准的要求,以及多年工作经验积累和产品资料的收集,对上述主要电气设备选型。

5.5.2 典型自控元件选择

燃烧器控制器(Burner Controls)又名燃烧程控器是燃烧自动控制关键元件,根据燃烧器的选型来确定,一般常用的有 LAL21 系列和 LOA21 系列。

5.5.3 电气控制元件的选择

船舶辅锅炉电气控制系统常用的低压配电产品及电线电缆应选用船检认证的产品。

5.5.4 船舶辅锅炉控制箱

船舶辅锅炉控制箱为挂壁式,并加装减振器。

6 船舶生活污水和油污水处理装置的电气控制

6.1 主要控制功能

6.1.1 船舶生活污水处理装置

船舶生活污水是指:

(1) 任何型式的厕所、小便池以及厕所排水孔的排出物和其他废弃物。

(2) 医务室(药房、病房等)的面盆、洗澡盆和这些处所排水孔的批排出物。

(3) 装有活畜禽货的处所的排出物。

(4) 混有上述排出物的其他废水。船舶生活污水处理装

置即指处理上述污水的装置。

船舶生活污水处理装置最主要分为物化法和生化法。物化法一般需要粉碎泵将污水粉碎，冲洗泵（阀）将污水稀释，加药阀加药将污水消毒，排放泵将处理达标的污水排放至舷外。生化法一般需要风机（气泵）为微生物充氧，加药泵加药将污水消毒，排放泵将处理达标的污水排放至舷外。

6.1.2 船舶油污水处理装置

这里所指的船舶油污水处理装置是指处理来自船舶机舱舱底含油污水的装置，当排出物的含油量超过 15×10^{-6} 时能发出报警并自动停止含油物的排放。

船舶油污水处理装置最主要采用重力法。一般需要抽吸泵将含油污水抽吸至处理装置，排油阀将处理出来的废油排出装置。

6.2 船舶生活污水和油污水处理装置分类及其控制系统的工作原理及特性

6.2.1 船舶生活污水处理装置

（1）船舶生活污水收集系统按其收集方式可分为以下几种。

1) 重力式。重力式收集可不需要增加任何附加设备，直接将管路接入处理装置的入口；也可将管路接入污水收集柜，再通过转驳泵按收集柜内液位定时将污水打入处理装置。

2) 真空式。真空式收集必须增加一套真空收集系统，主要由污水收集柜和喷射泵、电动排放阀（只能实现非处理舷外排放）或转驳泵（即能向处理装置转驳，又能实现非处理舷外/通岸排放）等组成。

污水收集柜既可以单独设置，也可以与处理装置连在一起。单独设置的除需要喷射泵外，还需要通过转驳泵将污水按收集柜内的液位定时打入处理装置，电动排放阀可根据需要选用。与处理装置连在一起的可除需设置喷射泵外，还可

根据需选择电动排放阀实现非处理舷外排放或排放泵实现非处理舷外/通岸排放。

喷射泵的作用可以有二个：一是与喷射器一起工作，在污水收集管路中产生真空，使船舶上安装的真空马桶能正常使用，二是与电动排放阀一起工作，将收集柜内的污水排放至舷外。转驳泵的作用也可以有二个：一是将收集柜内的污水定时转驳至处理装置；二是将收集柜内污水通过通岸接口或舷外排放。

图 6.3-17 为一种基本型真空收集系统的电气控制原理图。

本系统的喷射泵有二台，一台主泵，一台备泵，可通过选择开关 S5 设置。当真空收集管路的真空度下降到真空控制开关 SP1 设置的下限时，中间继电器 KA1 控制“主泵”先行起动；若经时间继电器 KT1 延时，管路的真空度仍未达到 SP1 设置的上限，则“备泵”跟进起动，至真空度达到 SP1 设置的上限时喷射泵停止。为防止喷射泵无水干转，在 KA1 的控制回路中增加了“收集柜超低位”液位开关的保护功能。

本系统的转驳泵也有二台，既可一用一备，也可同时起动。转驳泵有“处理”和“直排”二种功能，可通过选择开关 S6 设置。当选择“处理”时，转驳泵根据收集柜中、低液位开关的动作（中位起动，低位停止），由时间继电器 KT2 控制，定时将污水转驳至处理装置。为防止处理装置因各种原因而产生的高位溢出，在转驳泵的控制回路中加入了来自处理装置的“处理装置高位”停泵功能。当选择“直排”时，转驳泵根据收集柜中、低液位开关的动作（中位起动，低位停止），按装置阀门的不同选择进行“舷外排放”或“通岸排放”。

一旦出现故障引起真空收集管路真空度下降，将影响船上马桶的使用，故在其真空收集管路中增加了一个真空报警开关 SP2，当真空度低于 SP2 设置的下限时，发出报警。另

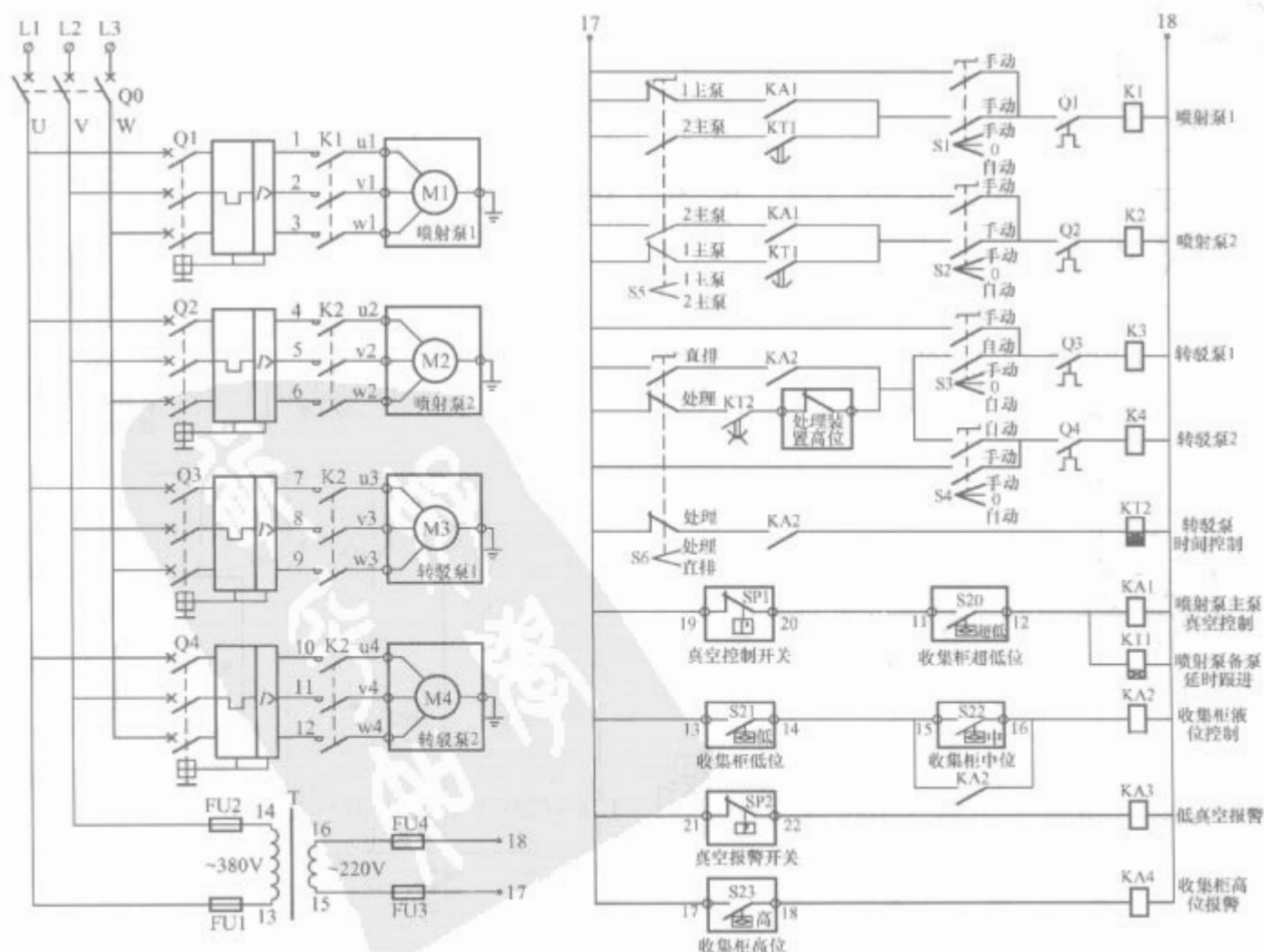


图 6.3-17 真空收集系统电气控制原理图（部分）

外,当收集柜因为各种原因而出现高位时,也将由设置在收集柜上的高液位开关发出报警。

(2) 船舶生活污水处理装置按其处理工艺主要可分为以下几种。

1) 物化法。该技术是一种粉碎+稀释+消毒的原理,对污水中的有机物不进行降解转化,只进行循环粉碎、加水稀释和加药消毒,使出水达到排放标准。

以 WCX 型生活污水处理装置为代表,它主要由处理柜、沉淀柜、粉碎泵、反冲洗泵、流程泵、污泥返送泵、排放泵、加药(电磁)阀等组成。

进入处理柜的生活污水由粉碎泵多次循环粉碎,直到固体残渣小到能通过细小的滤网。同时反冲洗泵工作,加水不断反冲洗滤网,以防滤网堵塞。加药(电磁)阀与粉碎泵同步,对生活污水进行加药消毒。通过滤网的污水由流程泵泵入一系列沉淀柜,使其悬浮固体下沉,沉降的污泥由污泥返送泵送回处理柜进行再循环粉碎处理。当最后一级沉淀柜内的沉清液达到中位时,排放泵工作,将上清液排至舷外。粉碎泵、流程泵、污泥返送泵、反冲洗泵、加药阀的运行主要受处理柜液位及时间的控制,排放泵的运行受沉淀柜内液位的控制。

图 6.3-18 为一种基本型 WCX 型生活污水处理装置的电气控制原理图。

本装置中粉碎泵、反冲洗泵、流程泵、污泥返送泵都由中间继电器 KA1 控制。当处理柜的液位达到中位时,由安装在处理柜上的中液位电极 M1 感知并将信号传至液位继电器 1K, 1K_中闭合使 KA1 得电,四台泵同时运行,至时间继电器 KT1 延时结束后停止。为防止处理柜高位溢出,在反冲洗泵的控制回路中加入“处理柜高位”停泵功能。加药阀的起闭与粉碎泵同步。排放泵的运行由沉淀柜的液位控

制,设置在沉淀柜的中、低液位电极 M2 和 L2 感知沉淀柜内的液位并将信号传至液位继电器 2K, 2K_中控制排放泵中位起动,低位停止。

当出现“处理柜高位”或“沉淀柜高位”时,设置在处理柜、沉淀柜的高液位电极 H1、H2 感知高液位并将高位信号传至液位继电器 1K、2K,由 1K_高、2K_高发出报警。

2) 传统生化法。该技术是利用生物的新陈代谢过程,将有机物转化成对环境无害的水和二氧化碳,对有机污染进行了根本上的去除。

以 WCB 型生活污水处理装置为代表,其主要控制对象为风机(气泵)、排放泵、加药泵。

WCB 型生活污水处理装置中风机(气泵)、排放泵、加药泵的运行控制方式与 MBR 型生活污水处理装置中的基本相同,在此不再详述。

3) 新型膜序批式生化法膜分离技术。该技术主要是将生化法与膜分离技术相结合,能快速分解有机污染物,增大装置有机负荷,减小生化体积;同时保证膜分离段处于低负荷运转,延长膜组件的使用周期和寿命。

以 MBR 型生活污水处理装置为代表,它主要由装置本体、膜组件、风机(气泵)、抽吸泵、排放泵、加药泵等组成。

装置本体主要由曝气柜、沉淀柜、污泥柜、膜柜及清水柜等组成。风机(气泵)的主要作用是为处理装置中的有机物供氧,只要装置正常运转,风机就必须开启。污水进入装置后先在曝气柜内进行好氧处理,然后进入沉淀柜进行初步的泥水分离,沉淀后的上清液进入膜柜,由抽吸泵将膜柜中能透过膜的清水抽吸至清水柜。沉淀后的污泥进入污泥柜。进入清水柜内的清水经过加药或紫外消毒进行杀菌,最后由排放泵排放至舷外。排放泵的另一个功能是定量排放污泥柜

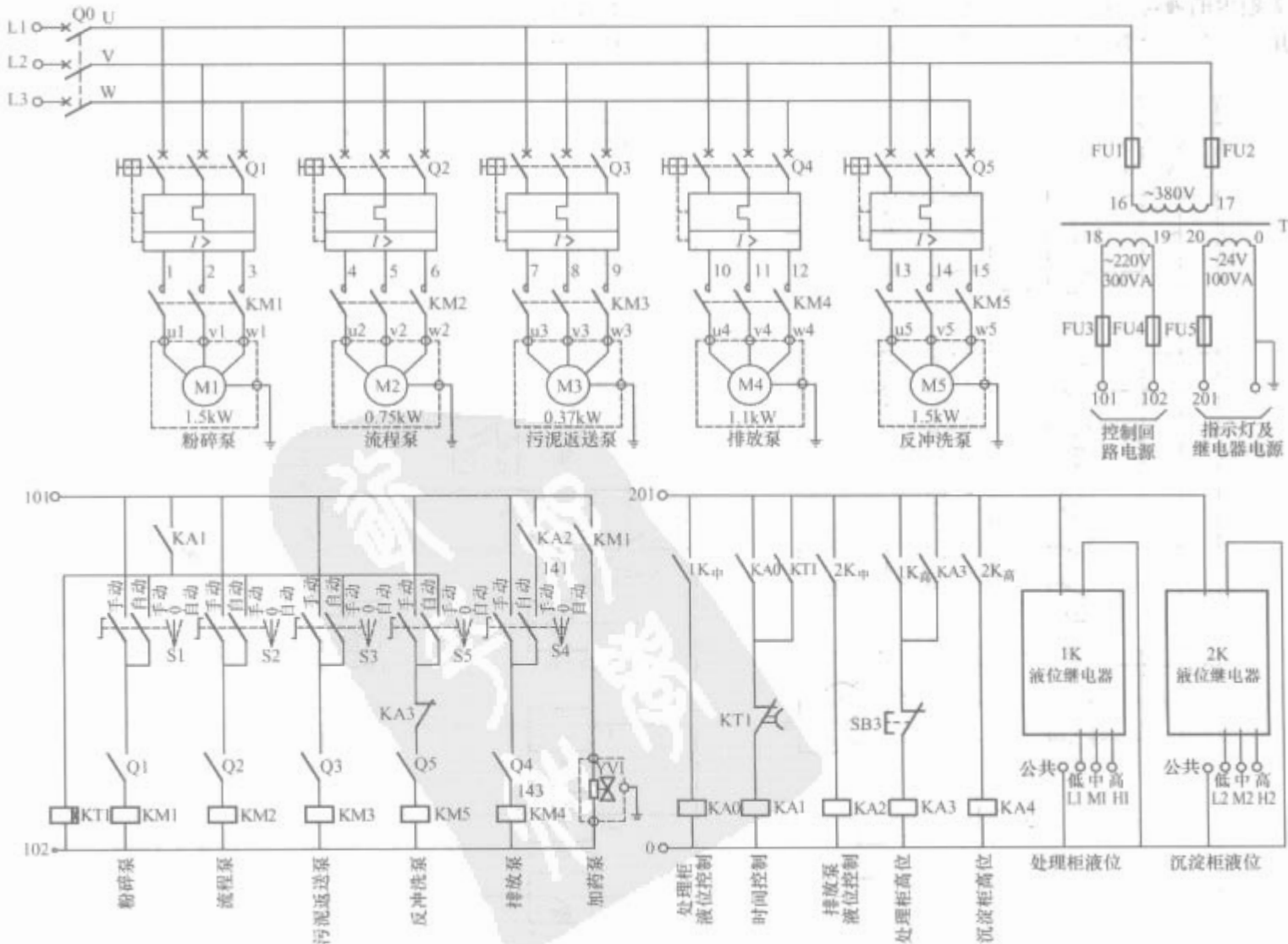


图 6.3-18 WCX 型生活污水处理装置电气控制原理图(部分)

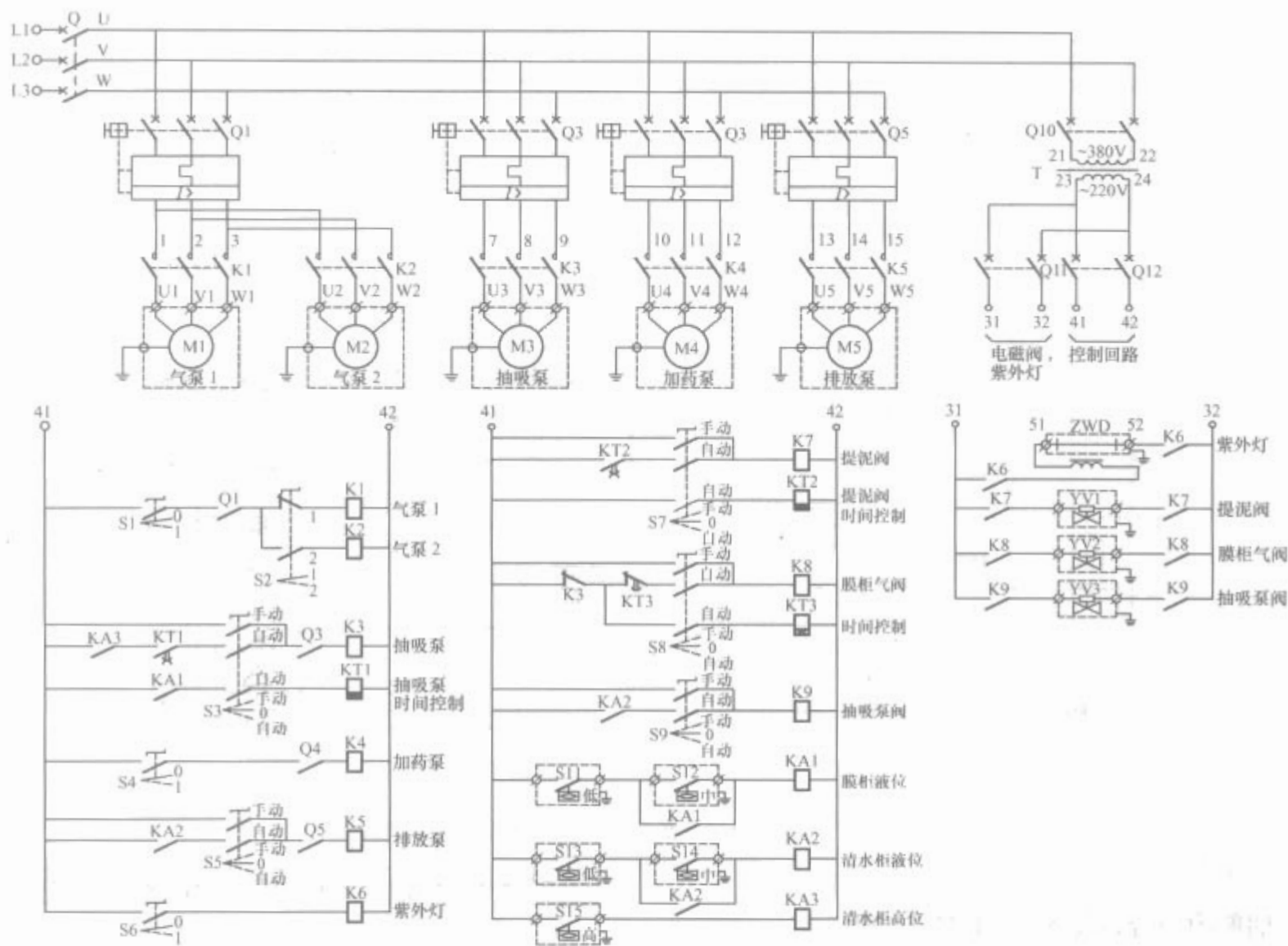


图 6.3-19 MBR 型生活污水处理装置电气控制原理图 (部分)

中的污泥。

图 6.3-19 为一种基本型 MBR 型生活污水处理装置的电气控制原理图。

本装置的气泵有二台，一用一备，可通过选择开关 S2 设置。只要装置运行，气泵常开。抽吸泵的运行是根据膜柜中、低液位开关的动作（中位起动，低位停止），由时间继电器 KT1 控制，定时将膜柜中能透过膜的水抽吸至清水柜。为防止清水柜高位溢出，在抽吸泵的控制回路中加入“清水柜高位”停泵功能。本装置中污水的消毒是通过紫外灯的作用实现的。本装置中排放泵的作用只有一个，即根据设置在清水柜的中、低液位开关的动作（中位起动，低位停止）将清水排放至舷外。

当装置出现“清水柜高位”等故障时，将发出报警。

6.2.2 船舶油污水处理装置

目前船舶油污水处理装置的主要处理技术为：

(1) 传统重力式。该技术是利用重力分离的原理，利用油水之间的密度差进行油水分离。但该技术在处理乳化液上存在困难。

以 YSCZ 油污水处理装置为例，它主要由分离筒、抽吸泵、加热器、排油（电磁）阀和超标（电磁）阀等组成。

油污水经粗滤器由抽吸泵泵入一级分离筒，由于油水的比重不同，粗大的油滴上浮进入顶部的集油腔，其余油污水进入第一级油滴聚合器，使油水再次分离，油污水含油量大大减少，然后再进入二级分离筒。经过二级分离后，排出水经油分浓度计（不属于装置）检测达标，排出舷外；如果经油份浓度计检测未达标，则打开超标（电磁）阀，将油污水回流至舱底。集油腔内的污油则通过排油（电磁）阀排入船

上设置的废油柜。加热器的作用是在低温条件下防止油的凝固，以利于排油。

图 6.3-20 为一种基本型 YSCZ 型油污水处理装置的电气控制原理图。

本装置的抽吸泵由按钮 SB1 起动，至舱底水抽空后由安装在抽吸管路上的真空开关 SP 控制泵的停止，必要时也可通过停止按钮 SB2 停止。加热器的运行由安装在装置油层附近的温度控制器 ST 自动控制。排油阀的起闭由安装在装置上的液（油）位讯号器控制，当一级分离筒下液（油）位讯号器 S2 感受到油位时，排油控制器 K1 动作，一级排油阀打开排油；当一级分离筒上液（油）位讯号器 S1 感受到水位时，排油控制器 K1 释放，一级排油阀关闭。二级排油阀的控制与一级相同。超标阀的起闭由安装在装置出水管路上的油分浓度计（不属于装置）控制，当排放水高于排放指标时，油分浓度计发出的报警信号传至控制箱，除打开超标阀外，还同时发出报警。

针对传统油污水分离装置存在的问题，2004 年 IMO 通过了 MEPC107.(49) 决议，要求在性能试验技术条件中增加油水乳化液的试验。按此新决议，目前国内外又开发许多新型的油污水分离装置，这些装置都是在原处理系统的后阶段加装了深化处理系统，其主要技术有：

(2) 膜分离技术。该技术是利用一种特殊的膜把油和水隔离开，使油被阻挡在膜的一侧，而水则在压力的作用下进入膜的另一侧。

目前该技术大多在国外的设备上有应用。

(3) 吸附分离技术。该技术的关键是吸附剂的选择，最新的研究体现在对高效经济的吸油剂的开发和应用。



图 6.3-22 船舶膜空分制氮装置工艺流程框图

和电控箱等组成。

膜空分制氧装置的特点：

- (1) 整套装置结构紧凑，占地空间小。
- (2) 实现全自动化，操作简单，运行可靠。
- (3) 能耗低，氮气品质高，氮气纯度在 94%~99% 之间位置设定。
- (4) 除压缩机外，没有运动部件，便于移动。

7.3 船舶膜空分制氮装置的电气控制技术

7.3.1 加热器调功控制

安装在加热器中部的热电阻传输到温度控制器，输出 4~20mA 直流信号，调功器接受信号，自动控制电力加热输出电压，达到其加热控制功率，改变加热空气的出口温度。

加热器调功控制框图见图 6.3-23。



图 6.3-23 加热器调功控制框图

7.3.2 加热器的温度控制

加热器的工作温度由温度控制器来决定的，当温度超温时，装置的相应组件停止加热，直到温度降下来自动恢复运行，这个超温称为第一超温。通常在电路中对电加热都有二级保护，若由于第一级超温元件损坏，温控仪内部的继电器或连锁触点不动作，控制电路设置的第二超温继电器动作，切断装置组件电源，停止工作，并发出声光报警。

7.3.3 加热线断线保护

在船舶设计规范中，对电加热断线保护有明确规定，一旦电加热器断线，必须报警并有指示。

7.3.4 含氧量控制

氧控器的氧浓度设定值为 5%，开始运行时，因温度比较低，氮气中的氧浓度在调整过程变化之中，此时的氮气氧浓度高于 5%，标氮电磁阀关闭而废氮电磁阀打开，废氮（即称非标氮）排出舱外；经过一段时间后，加热温度与氮气的氧浓度逐步稳定，氧浓度降到 5% 以下，这时的废氮电磁阀关闭而标氮电磁阀打开，向储气罐供应合格氮气。

氧量控制器是专为测量气体的一种数码或液晶显示的控制仪表，它是通过电化学敏感传感器元件来检测氧浓度。具有智能化、高精度、高可靠的特性。

在一些重要的舱室部位，也有单独设置的氧控制仪表进行检测，若氧分析仪显示氧含量在 18% 以下，意味着舱室缺氧，对人比较危险，应马上采取措施，打开通风设施，检查氮气泄漏处。

7.4 技术性能

7.4.1 控制性能参数

- (1) 加热温度控制精度 $45^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 氮气含氧浓度控制值 $< 5\%$ 。

7.4.2 电源

主回路：三相、交流、380V、50Hz。

控制回路：单相、交流、220V、50Hz，24V、50Hz，直流、24V。

其他电性能参数见本篇第一章 1.3~1.6 节。

7.4.3 工作环境

参照本篇第 1 章 1.2 节。

8 船舶用泵的电气控制

8.1 种类及其用途

泵是一种通用机械，种类甚多，按其作用原理可分为三大类：

8.1.1 叶片式泵

叶片式泵也叫动力式泵。这种泵是连续地给液体施加能量，如离心泵、混流泵、轴流泵、旋涡泵等。

8.1.2 容积式泵

在这种泵中，通过封闭而充满液体容积的周期性变化，不连续地给液体施加能量，如往复泵有活塞式、柱塞式，转子泵有齿轮式、螺杆式、环流活塞式、轴向柱塞式、径向柱塞式等。

8.1.3 其他类型泵

如射流泵、气体扬水泵、水锤泵、电磁泵、水轮泵等。

泵的用途极为广泛，可以说在国民经济各部门中，凡是有气体、液体流动的地方，就有泵在工作。其主要应用范围是：农田排灌、石油化工、动力工业、城市给排水、采矿、船舶工业、火箭燃料供给等。常用船舶舱室用泵的用途及工作特点如表 6.3-5。

表 6.3-5 船舶舱室用泵的类型及工作特点

序号	名称	用途	工作特点
1	冷凝水泵	使冷凝器中形成真空并抽出其中冷凝水	连续工作
2	循环水泵	将冷却水输送给冷凝器	连续工作
3	冷却水泵	抽送海水，供给主机汽缸、汽缸盖、空气压缩机和轴承等冷却用	连续工作
4	锅炉给水泵	从热水箱或炉水储水舱供水给锅炉	连续工作或周期工作
5	燃油泵	由主油舱将燃油送到日用油箱	约每隔 8~12h 工作 30~60min
6	滑油泵	将润滑油输送到机器的摩擦部分，以冷却机器的摩擦部分	连续工作
7	消防泵	主要用作消防，也可用作压舱泵或排水泵	连续工作（需要时用）
8	压载泵	输送压载，抽干或灌满压载水舱，也可用作消防、卫生及舱底泵的备用泵	若使用时约 1~2h
9	舱底泵	将舱底的积水排出	若使用时约 1~2h
10	卫生泵	将海水送到日用水柜	受水柜压力高低自动控制
11	淡水泵	将淡水由淡水舱送到日用淡水柜	受水柜压力高低自动控制

8.2 电气控制的主要技术指标

- (1) 额定工作电压和频率。
 - 1) 主电路：交流、三相、380V、50Hz。
 - 2) 控制电路：交流 220V、50Hz 或采用直流。
- (2) 额定工作电流。
- (3) 控制电动机额定功率。
- (4) 主要控制功能和要求。
- (5) 电气控制设备安装方式和防护等级。

8.3 电动机的选择

8.3.1 电动机的容量计算

(1) 容积式液泵。容积式液泵通常用作输送水、油等液体，其配用电动机功率可遵循公式 (6.3-1) 计算

$$P = \frac{rQ(H + \Delta H)}{102\eta_1\eta_2} \times 10^{-4} \tag{6.3-1}$$

式中：P 为泵的轴功率，kW；r 为液体密度，kg/m³；Q 为泵的流量，m³/s；H 为泵的扬程，Pa；ΔH 为管路压头损失，Pa；η₁ 为泵的效率，一般取 0.6~0.82；η₂ 为容积效率，一般取 0.94~0.98。

(2) 离心式液泵。离心式液泵是动力泵的主要形式，另外还有混流式泵及旋涡式泵，通常用作输送各种类型的水质液体，其配用电动机功率可遵循公式 (6.3-2) 计算

$$P = \frac{rQ(H + \Delta H)}{102\eta_1} \times 10^{-4} \tag{6.3-2}$$

式中：η₁ 为泵的效率，一般取 0.5~0.84。

8.3.2 电动机的起动转矩

电动机的起动转矩 T_{电起} 是电动机起动瞬时产生的电磁转矩。该转矩可从电动机样本中查取。一般为电动机额定转矩的 1~1.8 倍，即

$$T_{电起} = (1 \sim 1.8) T_{电e}$$

式中：T_{电e} 为电动机的额定转矩。为了使机组开始起动，必须满足 T_{电起} ≥ T_{静阻}。

电动机的起动转矩大致和电压二次方成正比，所以当电压降过大时，往往使机组不能起动。电动机的起动转矩曲线如图 6.3-24 所示。

为研究起动过程各转矩的关系，把泵起动转矩和电动机起动转矩曲线绘在同一图上，两曲线的交点 A 即为起动过程的稳定点。对于异步电动机驱动的离心泵，在关阀起动时，由于阻力矩较小，所以 A 点一般位于额定转矩点 e 之下，起动并不困难。对于同步电动机，当 n=0.95n_N 时，要求电磁转矩大于阻力矩，即 T>T_阻，这时投入励磁，即可牵入同步运行。如果机组的阻力矩过大，A 点位于 e 点之上，对于异步电动机，将处于低速超载运行，会导致电动机发热，甚至烧损。对于同步电动机，将无法牵入同步而不能运行。

如果电压降低，电磁转矩曲线如图 6.3-25 中的虚线所示

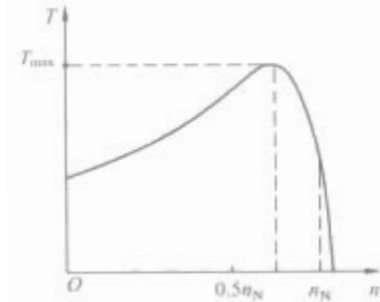


图 6.3-24 起动转矩曲线

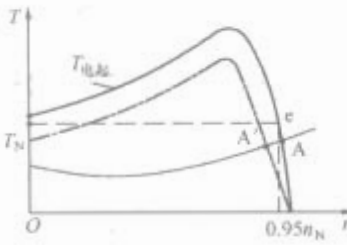


图 6.3-25 电磁转矩曲线

示，它和泵组力矩曲线交于 A' 点，这一点未达到同步转速，而且由于起动电磁转矩也相应降低，可能造成 T_{电起} < T_{机组} 而无法起动。

8.3.3 电动机负载特性

船舶用泵的负载特点见表 6.3-6。

表 6.3-6 船舶用泵的负载特点

名 称	空载时的负载 (%)	起动时的负载大小和负载特点
往复式活塞泵	30~40	额定负载，周期性变化，受缸数影响
离心泵（不注水）	7~12	—
离心泵（注水，但阀关闭）	40~50	轻载，通风机类型
齿轮泵和螺旋泵	—	额定负载，基本不变

船舶用泵的负载特性见图 6.3-26。

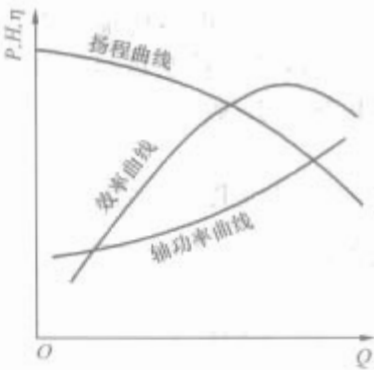


图 6.3-26 船舶用泵的负载特性

泵的流量不同则压力随之变化，同时效率也不同，这是对转速在某一不变值而言的。实际使用中，可能为了调节流量而导致压力变化，或者为了在某个出口达到某个压力而调节流量。两种情况和目的都用一个手段来调节，即用阀门和挡板开闭的方法进行调节。这在电动机的额定转速和额定工况条件下一般需作此调节，因为同一台机械在不同的船上会作出不同的调节。因此实际运行工作点的参数可能会和理论计算点的参数出入较大，从而引起电动机实际运行负载电流和额定值的不符，一般会偏小。

8.3.4 保证正常起动的措施

为了保证机组正常起动，可采用以下措施：

- (1) 尽量减小电动机的端电压降，以提高和电压二次方成正比的电动机起动转矩，使 T_{电起} > T_{静阻}。
- (2) 为减小水力阻力矩 M_{水阻}，离心泵要关阀起动，轴流泵要开阀起动。
- (3) 为了减小 T_{水阻}，可使泵在空气中起动，当达到额定转速时，再向泵中充水。对于潜没式大型水泵，可关闭吸入阀起动，或通入压缩空气把水位压至叶轮以下后起动。采用这种方法应注意，轴承，填料等的干摩擦问题。为此可充入部分水，即所谓半充水起动。
- (4) 对于大型轴流泵，起动时可顶起电动机转子，以改善推力轴承的润滑条件降低 T_{静阻}。
- (5) 对可调叶片泵，可关小叶片角度，以减小 T_{水阻}。
- (6) 采用专用起动发电机，液力耦合器等。

8.4 电气控制方式设计

8.4.1 磁力起动器控制

交流磁力起动器是用于笼型异步电动机全电压直接起动

的控制电器。直接起动具有控制设备简单、价格便宜、起动快速、可靠等优点,得到广泛应用。

功率较大的笼型异步电动机直接起动时由于起动电流较大,会引起船舶电网电压的瞬时跌落,从而导致电网其他用电设备的不正常运行。因此,根据船舶电站调压性能的不同,对允许直接起动的笼型电动机的容量限制也不同。

交流磁力起动器主要由电源开关、接触器、热继电器组成,并配以控制变压器、按钮、指示灯等元器件。起动器具有失电压和过载保护功能。

8.4.2 继电器-接触器控制

对于大、中容量的三相异步电动机,为限制起动电流,减小起动时对负载电压的影响,采用降压起动方式。降压起动方式有Y- Δ 降压起动、自耦变压器降压起动、延边三角形起动、定子串电阻或频敏变阻器起动、软起动等。对于某些供交流频繁起动、停止运行,正、反转运行,控制功能较多的,且具有过载、短路、断相和失电压保护功能的,要用较多的继电器、接触器并采用不同的控制方式,构成专用起动设备。

8.4.3 可编程序控制器控制

可编程序控制器凭其自身所具有的一系列特点,在现代控制和监测领域中占据着越来越重要的地位,其特点是:功能强大,不仅能实现各种复杂的逻辑控制和顺序控制,而且可靠性高和稳定性好,抗干扰能力强,在恶劣环境下能长时间不间断运行,且维护工作量小,配以通信接口和各种功能模块,可方便地和上位工控机相连,解决控制、监测和通信等问题,因而在船舶用泵电气控制中也得到广泛应用。

8.5 船用消防排水泵组电气控制实例

图6.3-27是潜水型消防排水泵组系统原理框图。

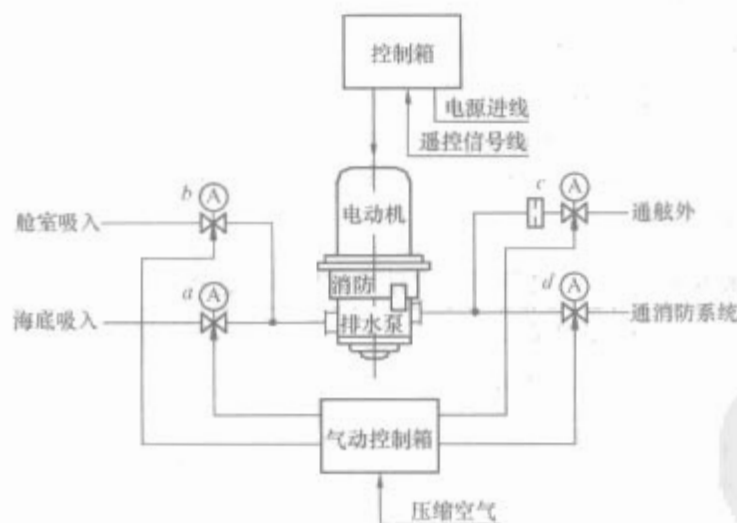


图 6.3-27 系统原理框图

8.5.1 潜水型消防排水泵组工作特点

本泵组由消防排水泵、干湿两用潜水型三相异步电动机、电气控制箱、气动控制箱、气动蝶阀等组成。

潜水型消防排水泵组用于消防工况和排水工况,具有较高的流量和扬程,工作必须稳定可靠。若作为消防泵使用,可为消防系统提供消防用水;若作为排水泵使用,可抽送冷却水、舱底水等;在消防工作状态下可直接转为排水工作状态。泵组既能长期连续运行,也可在水下一定深度连续运行。

消防排水泵用电动机是一种特种结构的电动机,电机外套用特种钢材制造,密封良好,可在深水下连续工作数小时。

消防排水泵由泵体、泵盖、转子、机械密封、泵架以及换向阀等部套零件组成。当泵组浸水状态工作时,泄放阀在空气压力作用下会自动闭合。换向阀的换向是利用空气的压力,通过齿轮机构由直线运动转变为换向阀的旋转运动。

气动控制箱主要由高压气瓶、减压器、换向阀、滤器、压力控制器、压力传感器等组成,其主要功能是将电气控制箱的电信号通过气动控制箱的换向阀控制气压实现水泵的两种工作状态,控制气动蝶阀的开闭。

电气控制箱采用可编程序控制器(PLC)进行程序控制,用于控制泵组的起动、停止、显示和远距离传输泵组的运行状态;数字显示水泵进、出口压力,并具有声、光报警功能;也能在控制室遥控起动和停止电动机,在一定的条件下还能自起动泵组。

8.5.2 电气控制技术性能指标

(1) 额定工作电压和频率

1) 主电路:交流、三相、380V、50Hz。

2) 控制电路。

a. 交流、单相、220V、50Hz。

b. 直流、24V。

c. 直流、5V。

(2) 额定工作电流,105A。

(3) 控制电动机额定功率,55kW。

8.5.3 电气控制线路分析

潜水型消防排水泵组电气原理简图见图6.3-28。

8.5.3.1 主电路

两路三相交流电源通过SA1转换开关引入,一路为正常供电,一路作为备用电源,当正常供电出现故障时,即可转入备用电源。当控制电路中KM交流接触器线圈得电后,其常开主触点闭合,电动机得电直接起动运转。热继电器FR为电动机M的过载保护电器,M的短路保护有上级自动开关的电磁脱扣来实现。电路中采用额定电流比为150/5A的电流互感器TA,配以150A的交流过载电流表,用于监视电动机的工作电流。

8.5.3.2 控制电路

控制变压器T作为控制电路的电源。控制方式分为手动和自动,当SA3置于手动时,用于各蝶阀的调试和检查;当SA3置于自动时,根据选择的工作工况(消防或排水),程序控制各阀的开启和关闭,当要求开启和关闭的蝶阀均到位后,起动电动机。若由于某些原因或蝶阀故障,使蝶阀开或关不到位,当电动机还没起动时,则将不会起动电动机,发出声、光报警信号。而当在运行过程中某个蝶阀出现开或关不到位时,则会根据程序设定的时间要求,停止电动机的运转,并提醒工作人员立即进行检查和故障排除。

直流24V电源用于各模块的供电。本电气控制箱各操作按钮、控制室操作按钮、蝶阀动作到位信号、现场各压力报警信号均接入PLC输入模块;控制各蝶阀用中间继电器、指示灯和报警信号、远传信号均接入PLC输出模块。

直流5V电源用于压力参数的显示。现场模拟量压力参数通过压力传感器接入模拟量模块,经CPU处理后,以通信传输方式送出至显示器。

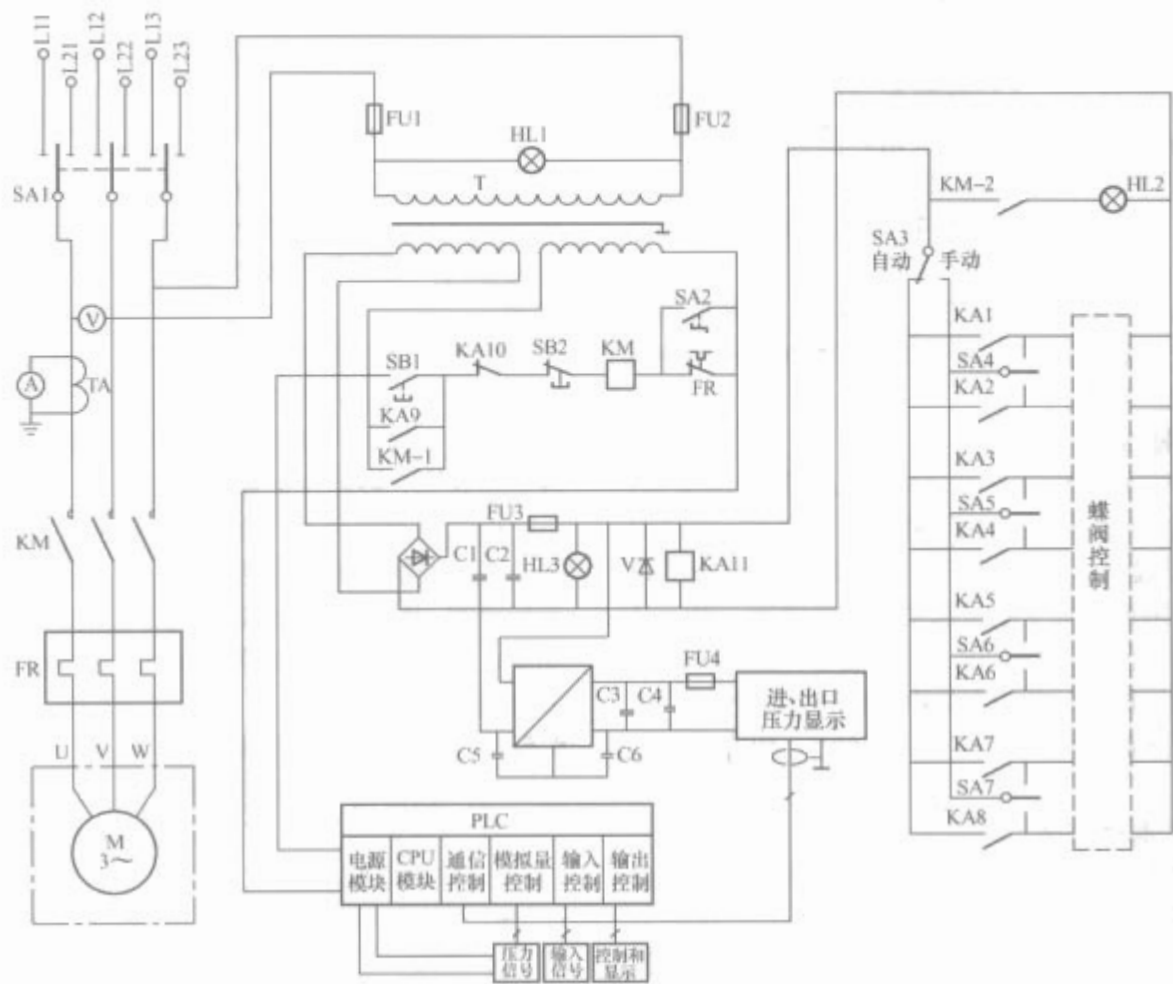


图 6.3-28 潜水型消防排水泵组电气原理简图

9 船舶空压机电气控制

9.1 种类及其用途

在船舶上，压缩空气使用极广，压缩机将空气压缩成具有一定压力的压缩空气，经油水分离器、过滤器将水蒸气、油气、浮粒析出分离，将干燥、洁净的压缩空气储存于空气瓶中，用于柴油机起动、汽笛、海底门冲洗、海水、淡水压力柜充气、风动工具以及自动控制自动调节机构等。对军舰来说，还用于发射武器及潜艇的上浮等。容积式压缩机分为往复式（活塞压缩机）及回转式（罗茨压缩机、螺杆压缩机）两类结构。船舶空压机、冷藏压缩机、空调压缩机均为往复式活塞压缩机，个别大型空压机、制冷压缩机为回转式螺杆压缩机。船舶用空压机的类型及性能特征见表 6.3-7。

表 6.3-7 船舶用空压机的类型及性能特征

序号	名称	工作特点				
		排气压力 (MPa)	容积流量 (m ³ /min)	调节性能	结构， 零部件	工作腔 润滑
1	往复式	一般 0.2~32 最高 700	0.1~400	排气压力 稳定	复杂	有、无
2	回转式	一般 0.2~1 最高 4.5	0.1~500	排气压力 稳定	较简单	有、无
3	离心式	一般 0.2~15 最高 70	10~3000	排气压力随 流量变化	简单	无
4	轴流式	一般 0.2~0.8	200~10 000	排气压力随 流量变化	简单	无

9.2 电气控制的主要技术指标

- (1) 额定工作电压和频率。
 - 1) 主电路：交流、三相、380V、50Hz。

- 2) 控制电路：交流 220V、50Hz 或采用直流。
- 3) 控制方式：直接起动或降压起动。
- (2) 额定工作电流。
- (3) 电动机额定功率。
- (4) 主要控制功能和要求。
- (5) 电气控制设备安装方式和防护等级。

9.3 电动机的选择

9.3.1 结构型式及机型选择

(1) 根据压缩机处理的气体与工作的环境来选择合适的电动机结构。通用的电动机结构分开启式、防护式、封闭式及防爆式四种。一般的选择原则根据工作环境条件来选择，见表 6.3-8。

表 6.3-8 工作环境与电动机结构形式选择

工作环境条件	电动机的结构型式
没有灰尘、油污、瓦斯的干燥房间	开启式 (IP-11)
干燥的、没有灰尘的房间，但有大的或小的物件掉进电动机的危险	防护式 (IP-22、IP-23)
有灰尘或潮湿的房间	封闭式 (IP-44、IP-54)
露天	防雨和防溅式
高温房间	有阻燃绝缘的封闭式
十分潮湿或有腐蚀性气体的房间	用清洁空气通风或有抗酸绝缘的封闭式电动机
有爆炸危险的气体	防爆式或隔爆式

对于有良好通风环境的氢压缩机及天然气 (CH₄) 压缩机，在不可能形成达到爆炸极限的混合气情况下，也可选用开启式电动机。

- (2) 一般情况下都选用交流电动机，交流电动机结构简

单、方便,价格低廉。只有仅具有直流电源或要求平滑宽调速场合,才选用直流电动机。

(3) 笼型异步电动机的结构简单、运行可靠、价格便宜,对转矩波动也不敏感,是中、小型压缩机广泛采用的型式。但功率因数较低,起动电流较大,故要求有较大的电网容量,一般要求单独变压器容量应在电动机功率 2.5 倍以上。

绕线转子异步电动机结构复杂,由于有滑环的原因可靠性较差,价格比笼型异步电动机要贵,故只有当起动转矩较大或电网容量偏小而又无法增大时方予选用。

在压缩机驱动中,异步电动机用于功率小于 150kW 的场合,但在大电网中可达 700~1000kW。

虽然同步电动机需转子励磁,结构比较复杂,价格较贵。但其转速、转矩稳定,功率因素和效率都较高,因而是选异步电动机还是选同步电动机应综合考虑,特别是对大功率空压机的选配更应如此。

9.3.2 电动机转速选择

当压缩机转速(同步) $n_0 \leq 1500 \text{r/min}$ 时,涉及配何种转速的电动机问题。一般功率大于 150kW 时,考虑到带传动装置的复杂性,大都选用与压缩机转速相同的电动机。功率小于 150kW,尤其是功率小于 50kW 并且非连续运行时,选用高于压缩机转速的电动机可能更经济,因为高转速电动机价格便宜、功率因数高、电动机效率高。

9.3.3 电动机容量(功率)选择

对于压缩机配用的电动机其功率计算比较复杂,因其功率的大小与各级之间的排气量、气缸行程、容积、排气系数、进气压力、进气温度、抽气系数、干气系数等都有关。现从以下几个方面来考虑进行电动机的选择。

电动机的容量应选得与由它传动的压缩机的工作状况完全相称。压缩机工作的状况有三类:① 长期连续运行;② 间歇运行(重复短时运行);③ 短时运行。电动机也有长时制工作、间歇工作与短时制工作三种。

(1) 长期连续运行。压缩机属恒定转矩工作的机械,应选轴功率尽量与电动机额定功率相等的产品,以使电动机在效率最高与功率因数较大的情况下工作。由电动机转矩—转速曲线及寿命试验条件可知,在室内环境温度低于 40℃ 情况下,偶尔出现超负荷在 15% 以内,交流电动机是可以满足的。因此,电动机选配时没有必要再增加 10%~15% 余度。一般电动机产品目录中除有特殊说明外,均为长时制工作电动机。

(2) 间歇运行(重复短时运行)。重复短时运行的电动机在工作期间,温度来不及升高到稳定值便停机。在停歇期间,温度也来不及冷却到周围环境的温度。重复短时运行情况,可以用负载持续率 FC 这一概念来表征。计算见式(6.3-3)

$$FC = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} = \frac{t_w}{t_p} \times 100\% \quad (6.3-3)$$

式中: t_w 为电动机负载工作时间; t_p 为工作周期。

专供重复短时运行的电动机有四种标准 FC 值: 15%、25%、40%、60%。在 $FC > 60\%$ 时,应该选用按连续运行设计的电动机;在 $FC < 15\%$ 时,应该选择短时运行的电动机。有了重复短时运行的负载图,则可计算出等效转矩 T (N·m) 或等效功率 P (kW)。见式(6.3-4)和式(6.3-5)

$$T = \sqrt{\frac{T_1^2 t + T_2^2 t + T_3^2 t}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (6.3-4)$$

$$P = \sqrt{\frac{P_1^2 t + P_2^2 t + P_3^2 t}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (6.3-5)$$

然后根据 T 或 P 及 FC 值,在重复短时运行电动机的产品目录中选择最合适的电动机。如果实际的 FC 值不等于产品目录中标准的 FC 值,必须先按照下列公式将实际的 FC 的功率 P_x 换算到标准 FC 的功率,见式(6.3-6)

$$\begin{aligned} P_{15} &= P_x \sqrt{\frac{FC}{0.15}} & P_{25} &= P_x \sqrt{\frac{FC}{0.25}} \\ P_{40} &= P_x \sqrt{\frac{FC}{0.40}} & P_{60} &= P_x \sqrt{\frac{FC}{0.60}} \end{aligned} \quad (6.3-6)$$

然后再在标准 FC 值下选择功率合适的电动机。

(3) 短时运行。一些小型空气压缩机通常属短时运行。电动机在运行期间温度达不到额定温升,而在停歇时间内,电动机能冷却到周围媒质的温度。短时运行电动机的容量选择原则是:根据实际载荷及运行时间,求出规定短时工作定额下(10min、30min、60min、90min)的等效转矩(等效电流或等效功率),然后据此在短时运行电动机的产品目录中选择合适的电动机,并校验其过载能力。

电气控制方式类同于船舶用泵电气控制。

9.4 船舶空气压缩机组的电气控制实例

9.4.1 船舶空气压缩机组电气控制的工作特点

该电气控制采用交流 50Hz、电压 380V 的绕线转子异步电动机拖动,采用在电动机转子中串接频敏变阻器的起动方式,以较小的起动电流产生较大的起动转矩,实现电动机的无级平滑起动。

9.4.2 电气控制技术性能指标

- 1) 主电路:交流、三相、380V、50Hz。
- 2) 电动机额定功率:90kW。
- 3) 额定工作电流:电动机定子额定电流 $I_{1e} = 171\text{A}$,电动机转子额定电流 $I_{2e} = 139\text{A}$ 。
- 4) 工作制:间断长期工作制。
- 5) 起动电流 $I_{1Q} \leq 2.5 I_{1e}$ 。
- 6) 起动转矩 $T_Q \geq 0.7 T_e$ 。

9.4.3 电气控制线路分析

船舶空气压缩机组电气原理见图 6.3-29。

电动机采用在转子绕组中串入频敏变阻器的起动方式。

频敏变阻器是一个无触点元件,在电路上相当于一个等值阻抗。等效阻抗的大小随电动机转子电流频率的下降而自动下降,也即随电动机转差率的下降而下降。

合上 Q 后,按下 SB2,KT1、KM1 动作,KT1 通电延时,电动机转子串入频敏变阻器 RBP 开始起动。起动初 $t = 0$ 时,转子电流的频率 $f_2 = s f_1 = f_1 = 50\text{Hz}$ (s 为电动机转差率, f_1 和 f_2 分别是定子电流和转子电流频率)为最大,故起动初时的 RBP 的等效电阻 R_{bp} 和等效电抗 X_{bp} 最大,因此限制了电动机起动电流,但因 R_{bp} 大,故使 M 的起动转矩较大(与定子降压起动相比)。随着电动机 M 转速上升, s 下降, R_{bp} 和 X_{bp} 随之自动下降,但因转速上升,电动机转子电流总的趋势是下降。KT1 延时到后, KM2 动作,切除 RBP,电动机进入自然特性工作,电动机在加速力矩作用下继续加速,直至电动机转矩和负载转矩相平衡,进入稳态运行。

控制电路为一般常规线路。

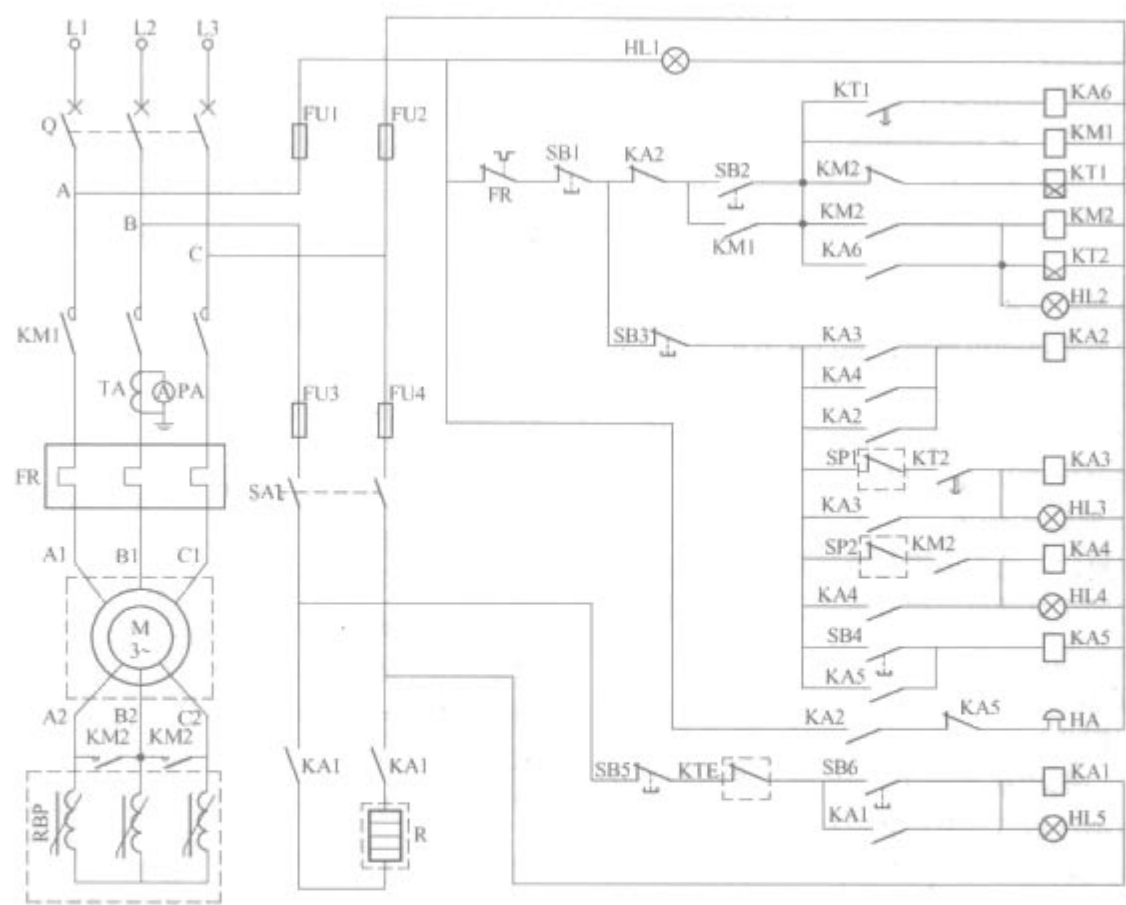


图 6.3-29 船舶空气压缩机组电气原理图

第4章 船舶特种机械电气控制

1 船舶减摇鳍电气控制

1.1 类型及工作特点

减摇鳍是用于减小船舶在涌浪海况下航行时横摇角的一种装置,它可以提高船舶的适航性,为船上其他设备的使用及改善船员的工作和生活环境,提供较平稳的工作条件,是目前最好的主动式减摇装置。在舰艇、高速客船、邮轮、渡船、公务船上,大都安装这种装置。该装置是成对安装在船

舶两舷艏部伸入水中的展弦比为1~2的机翼型翼片。该翼片类似鱼的鳍,故称之为减摇鳍,其鳍可绕鳍轴线转动。当船在涌浪中航行并横摇时,在自动控制系统(见图6.4-1)的控制下,根据横摇情况,不断地改变鳍角的大小,在水流作用下使鳍上产生的升力在左右两舷的方向始终相反,一边产生向上的升力,另一边产生向下的力,其总的力矩(稳定力矩)恰好抵消风涌浪的扰动力矩,从而达到减小船舶横摇的目的,见图6.4-2。

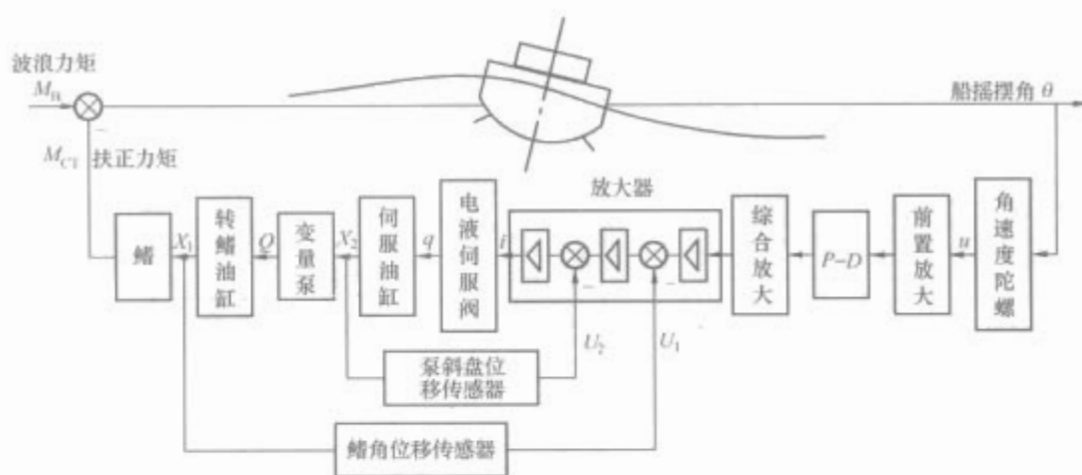


图 6.4-1 减摇鳍控制系统框图

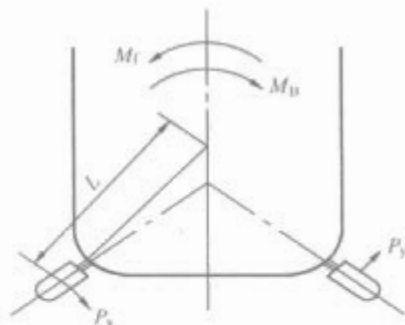


图 6.4-2 稳定力矩示意图

稳定力矩表达式见式(6.4-1)

$$M_t = 2LP_y \quad (6.4-1)$$

式中: M_t 为稳定力矩, $10\text{N} \cdot \text{m}$; L 为鳍上升力作用点到船舶重心的距离, m ; P_y 为升力, kgf 。

计算值见式(6.4-2)

$$P_y = \frac{1}{2} \rho V^2 C_y A \quad (6.4-2)$$

式中: ρ 为海水密度, kg/m^3 ; V 为船的航速, m/s ; A 为鳍面积, m^2 ; C_y 为升力系数(鳍形设定后,其值与鳍转角 α 有关)。

由上述可知,稳定力矩与鳍面积 A 、鳍转角 α 成正比,而与航速 V 成平方关系。对某一条船来说,设计制造后,鳍面积 A 不变,在一定航速下航行时, V 基本上是一个常数,故控制鳍转角 α 也就控制了稳定力矩。同时,为了不使鳍轴受过大的应力,在控制系统中,船的航速信号也参与控制,当船的航速高出装置的设计航速时,鳍角将按以下的规律减小,见式(6.4-3)

$$\alpha = (V_0/V)^2 \alpha_0 \quad (6.4-3)$$

式中: V_0 为船的设计航速, m/s ; V 为船的实际航速, m/s ; α_0 为设计转鳍角, $(^\circ)$; α 为航速变化后的实际转鳍角, $(^\circ)$ 。

减摇鳍装置有非收放式和收放式两种。

非收放式减摇鳍装置的鳍一直伸出在舷外,按控制规律转动,产生升力。其主要优点是结构简单,适用于各种船舶,但是鳍的升力系数较收放式鳍的升力系数小,因而在鳍

面积相等、船的航速一样的情况下,升力较小。

收放式减摇鳍的鳍是只有当船在风浪中航行而需要减摇时,才将鳍放出舷外,在控制信号的作用下转鳍,产生稳定力矩,不用鳍时,将鳍收进船舱。收放式减摇鳍在机械结构上按收放方向分又有伸缩式、前收式和后收式三种结构形式。

1.2 结构和运行特性

减摇鳍装置主要由电气控制分系统、液压分系统和机械分系统三部分组成。(以下若无特殊说明,减摇鳍装置特指液压机组为泵控系统、执行机构为收放式的减摇鳍装置。)

1.2.1 电气控制分系统

电气控制分系统中包括强电的电力拖动部分和弱电的信号处理部分。电力拖动的结构是传统的结构,只是在停止回路中串联了一个应急停止开关。弱电的信号处理采用直流形式,信号源采用当代最先进的压电晶体速度陀螺,其特点是体积小、重量轻、结构简单、耗能小而且稳定可靠。系统校正采用模拟形式,信号处理和运算放大器显示、检测都很方便。系统中还采用了可编程序控制器,用以处理相关程序,可编程序控制器在调试、操作和维护方面都很方便。图6.4-3是一艘1.4万t级船收放式减摇鳍装置的电气控制原理图。

1.2.2 液压分系统

减摇鳍装置的液压系统通常有泵控系统和阀控系统之分,泵控系统比阀控系统复杂,但功率消耗随负载大小而改变,比较节能,因此选用泵控系统较为普遍,特别是功率比

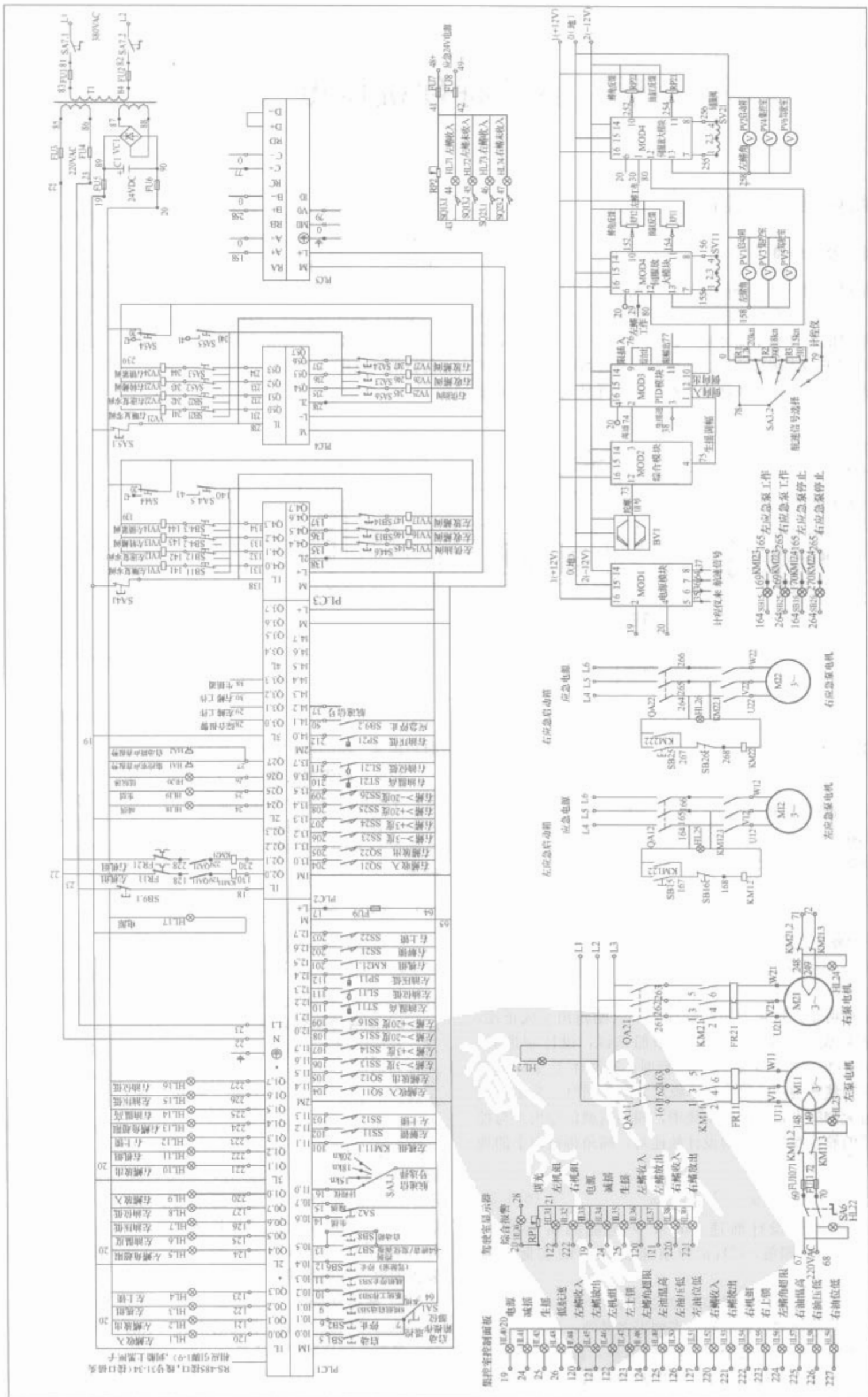


图 6.4-3 收放式减摇鳍电气控制原理图

较大的情况下均采用泵控系统。泵控系统由收放鳍回路、伺服回路、转鳍主回路、补油回路、复零回路和应急手动回路等组成，具体原理图见图 6.4-4。

1.2.3 机械分系统

作用是将鳍产生的升力传给船体，是承力构件，它主要由转鳍机构、锁零机构、鳍角发送器、收放鳍机构、密封和润滑系统组成。

1.3 主要技术性能

通常船舶安装有减摇鳍后应有以下效果：能够提高船舶的安全性，改善船舶的适航性；改善船上工作条件，提高船员工作效率；避免货物碰撞及损伤；提高船舶在风浪中的航速，节省燃料，延长其他船舶设备的使用寿命；保证特殊作业，如：直升飞机起降，观测仪器准确使用等。在满足上面的一些基本原则要求外，还应考核的具体技术性能指标包括：

1.3.1 规定海况下的减摇效果

减摇效果通常以减摇百分数 K 和剩余摇摆角 θ 表示。考虑到船舶在不规则波中的横摇情况，通常用减摇前和减摇后的三一横摇幅值来计算减摇百分数，见式 (6.4-4)

$$K = \frac{(\bar{\theta}_{A/3})_{未减摇} - (\bar{\theta}_{A/3})_{减摇}}{(\bar{\theta}_{A/3})_{未减摇}} \times 100\% \quad (6.4-4)$$

式中： $\theta_{A/3}$ 为船舶的三一横摇幅值。

1.3.2 装置的重量和功率

装置的重量通常占船舶总排水量的 0.5%~1%。
装置耗用能源功率应含电源条件和冷却水条件。

1.3.3 船在静水中的航速损失

装设了减摇鳍后，鳍成为船体的附体，使船在静水中航行时的阻力增加大 4%~6%，比不装减摇鳍时船的静水航速下降 1%~3%。

1.3.4 可靠性

装置为连续工作制，平均故障间隔时间 (MTBF) 通常应不小于 1500h。
不能在船上修理的零部件的平均故障间隔时间通常应不少于 8000h。

1.3.5 维修性 (船员级)

恢复功能用时间 (MTTRF) 不大于 3.0h。
平均修复时间 (MTTR) 不大于 1.0h (船员级)。

1.4 电气传动控制的主要元器件的选用

由于船舶航行在环境瞬息万变的海面上，工作环境非常恶劣，比如机舱内的温度能够达到 55℃，湿度更可以达到 95%，并且存在各种强烈的冲击、振动、霉菌、盐雾和电磁干扰等，这就要求安装在船上的减摇鳍系统有较强的适应能力。在减摇鳍的电气设计选型中，必须考虑到以上的这些特点。元器件的选取是减摇鳍电气控制系统设计的一个重要工作，它直接关系到整个系统的控制精度、可靠性、使用寿命等。主要包括角速度陀螺的选型，电动机机功率的确定，电气元件的参数计算，可编程序控制器的选择，设备内外部的电线、电缆选型等。

从图 6.4-1 中可以看出，角速度陀螺是减摇鳍装置中的关键部件之一，其性能优劣直接影响到减摇效果，作为系统控制的信号源，它必须具有灵敏度高、频率响应快、频带宽的特点。通过实船验证，CS6B-6 型角速度压电陀螺可以满足控制系统的要求，达到满意的减摇效果。较之传统的中频转子式陀螺有许多优越之处。

电动机的功率是根据液压机组中泵的排量、压力和转速来确定的。图 6.4-3 中，系统总电功率三相 380V，50Hz，100kW。

电气元件的参数是按照电气控制的一般设计原则计算，元件须优先选择具备船级社认证的产品，其次再考虑经过三防处理的湿热带型产品。

船用减摇鳍装置电气控制箱内部和外部的电缆电线均选择低烟、无卤、阻燃型。控制箱内部连接电线必须选用

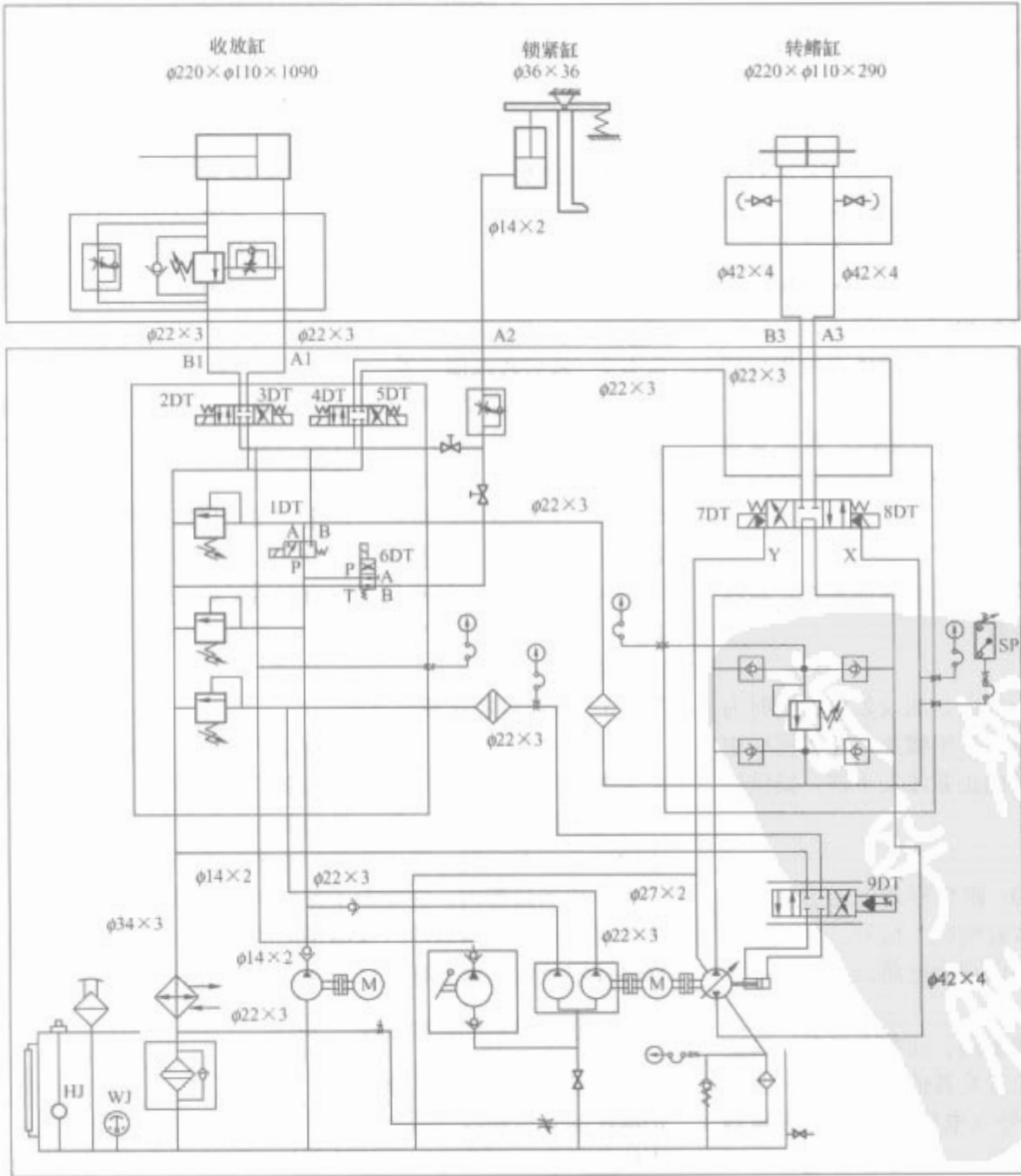


图 6.4-4 泵控液压系统原理图

1mm²以上的船用软电线；外部电缆可选用乙丙绝缘交联聚烯烃内套裸钢丝编制铠装船用电力、控制电缆。

船舶上空间狭小，对所安装设备的体积也有一定的要求。由于减摇鳍随动系统工作环境的特殊性，对系统中的可编程控制器有较高的要求。考虑到性能指标、功能、体积和价格等因素，系统选用了西门子 S7-200 系列可编程控制器。

1.5 电气控制设计

1.5.1 减摇鳍装置电力拖动设计

减摇鳍装置电力拖动设计时应能满足装置技术性能的要求，在减摇鳍舱、集控室和驾驶室等不同操纵部位都能控制电动机的起停，系统设有操纵部位转换开关，以防同时操纵。油泵机组的起动一般具有手动和自动两种方式，通过转换开关进行方式切换。在机旁手动方式下可按下起、停按钮，分别起、停各油泵机组，在其他地方操作起动和停止按钮则按照程序自动起停整套装置。

油泵机组在船舶电站容量允许的情况下可直接起动，如果容量有限通常采用星/三角降压起动。

拖动控制线路中设有过载报警，短路保护等，由于 SOLAS 对装置要求在主电源失电时，能有一套应急系统能将放出的鳍收回鳍箱，所以装置还设有一套由应急电源供电的应急电机接入液压系统。

1.5.2 随动控制系统的设计

减摇鳍装置控制系统是一随动控制系统，该随动系统应尽可能“快速、准确、稳定”地工作，目前，大多数减摇鳍的随动系统都是“电—液随动伺服系统”。

结合图 6.4-1、图 6.4-3 和图 6.4-4 可以看到，该系统的工作原理是首先将来自角速度陀螺的信号送到前置放大电路板、PID 板和综合放大板进行处理，与鳍角反馈信号进行代数求和、校正、放大，然后再与油泵反馈信号进行二次求和、校正、放大，接着送到鳍机械组合体上的射流管电液伺服阀，进行电—液信号转换。电液伺服阀根据放大器板输出信号的大小和极性调节液压油的流量和流向，使液压缸的活塞速度和运动方向发生变化，带动鳍机械组合体上的摇臂转动，使鳍转动到一定的角度产生相应的对抗力矩。图 6.4-3 中，可编程序控制器主要具有开关量输入/输出、模拟量输入/输出、实现系统中的起动、停止、报警和数据通信等功能。

1.5.2.1 电源模块

输入 24V DC，输出 ±12V DC，供电给其他模块、角速率陀螺、鳍角发送器和油缸反馈装置。

1.5.2.2 综合模块

对来自角速率陀螺的信号进行放大、滤波处理。同时为了使船能够在风平浪静的海况下可以产生横摇，在本模块中还设计了一个可以调节频率和幅值的正弦波发生器，提供生摇信号。

1.5.2.3 PID 模块

对经滤波处理的信号进行 PID、限幅等处理后送航速调节电路，再返回并经倒向耦合形成转鳍指令信号。生摇信号接通时也进入限幅、航速调节、倒向耦合电路。

1.5.2.4 主放大模块

主放大模块与液压机组上的伺服阀、柱塞变量泵、油缸反馈装置和转鳍油缸、鳍角反馈装置及其他有关设备一起组成转鳍伺服系统，将指令转鳍信号（电信号）转变成鳍转角。主放大模块还提供鳍角指示信号。

1.5.2.5 可编程序控制器

可编程控制器在本系统中主要用于：

1) 对来自系统油源机组的信号进行检测，如发现油温、油压、油位等出现故障，系统停机并自动报警。

2) 对来自系统的状态信号进行检测并提供相应的系统状态指示。

3) 接受来自计程仪的航速信号，进行处理后按式 6.4-3 自动调节输出鳍转角。

2 船舶减摇水舱电气控制

船舶在风浪中航行会产生过大的横摇，对船舶的操纵，船上设备的运行，船员的生活都会产生一系列有害的影响。为了减少船舶的横摇，除了在设计上采取对抗横摇比较有利的船型之外，最普遍的就是在船上加装减摇设备，而目前用得最多也是技术最成熟的减摇设备是减摇鳍和减摇水舱。

对于中高速航行的船舶来说，利用减摇鳍可以有效减小横摇，效果可以达到 90% 以上；但是对于船舶在低航速和零航速时，减摇鳍的作用大大减小甚至不起作用，这时候就不能靠减摇鳍来减摇。而减摇水舱在各种航速下都能减少船舶的横摇，在设计得当的情况下，减摇效果可以达到 40%~60%，同时它是利用船舶本身摇摆产生的能量使水舱内的水在水道内往复运动和在舷边水柜内上下波动，借以产生抵抗横摇的稳定力矩来减少船舶的横摇，所以所需的控制功率很少。因为它具有结构简单，造价低廉，便于保养的优点，得到了越来越广泛的应用。

2.1 减摇水舱的分类

按照减摇水舱工作的方式不同，通常可以分为以下三类：

2.1.1 主动式减摇水舱

它是借助泵，根据横摇的情况，把水从向下运动的一舷打向向上运动的一舷，从而减小船的横摇。主动式水舱能够获得满意的减摇效果，但是由于需要消耗很大的功率，大大的限制了它的适用范围。

2.1.2 被动式减摇水舱

它本身没有动力和控制系统，依靠船舶的横摇带动水舱内水的流动产生减摇力矩。正因为如此，该水舱的减摇效果受海况的影响十分突出，在发生谐摇的情况下减摇效果可达 50% 以上，但在某些海况下甚至会发生增摇的现象，必须加以避免。被动式水舱包括 U 型减摇水舱和自由液面减摇水舱两种。被动式减摇水舱尽管有严重的缺点，但是因其造价低，几乎不用维护，也能获得一定的减摇效果，也获得了广泛的应用。

2.1.3 被动可控式减摇水舱

被动可控式减摇水舱是在被动式减摇水舱的基础上发展起来的一种具有广阔发展前景的新型减摇水舱，它通过在两边舱的顶部安装气阀，用少量的能量控制气阀的开关来实现水舱内水流的控制，使水舱中的液体总是保持在船舶向上运动那一边的边舱内。它克服了被动水舱的固有缺点，在计算机的控制下改变水舱内水流振荡的周期，以适应经常变化的外界波浪条件，保证在任何条件下都有较好的减摇效果。

2.2 减摇水舱的基本原理

由于船舶的较大的横摇主要集中在谐摇区内，因此减小谐摇区的频率响应函数是减少横摇幅值的关键。传统的被动水舱是根据“双共振”思想设计的，即使水舱水流振荡和船舶横摇运动具有相同的固有周期。在波浪扰动力矩作用下，

当船舶发生谐摇时,船舶横摇的相位落后于波浪力矩 90° ,船舶横摇与水舱水的运动谐摇时,水的运动相位落后于船舶横摇运动 90° (如图6.4-5所示),当这两种现象同时发生时,即发生双重共振现象,使水舱内水流振荡对船体产生的力矩与波浪对船体的扰动力矩的相位相反,从而抵消部分波浪扰动力矩,以达到水舱的最佳减摇效果。同时也可以看出,水舱的减摇效果并不依赖于航速,这也是减摇鳍不能替代减摇水舱的主要原因。

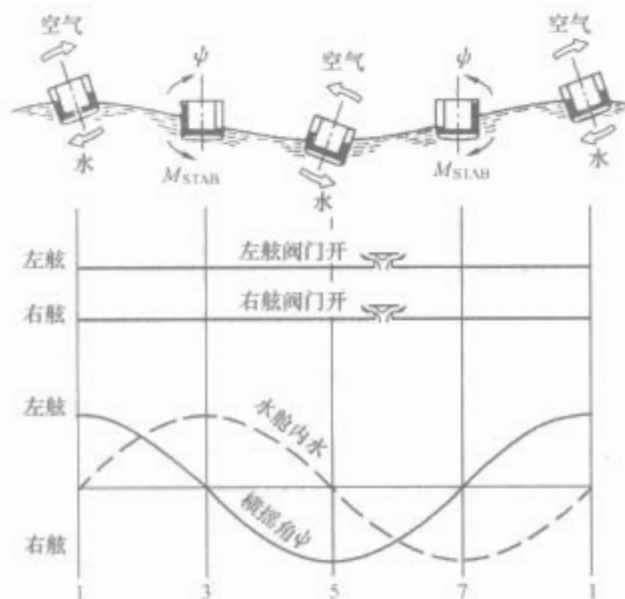


图 6.4-5 船舶和水舱共振相位循环图

纯被动式减摇水舱就是通过设计水舱的自摇周期(舱内水的充分振荡的时间)与船舶在营运时的横摇周期近似而达到较好的效果。而被动可控式减摇水舱则是通过控制系统的作用,当船舶因海况变化或者船舶装载情况变化而导致的自身横摇周期的变化时,即使偏离了谐摇区仍能提供较好的减摇效果,从而扩大了适用范围。

2.3 被动可控式减摇水舱的控制系统组成

被动可控式减摇水舱的控制系统由传感器、控制中心、执行机构三部分组成,其框图如图6.4-6所示。由倾角传感器传来的横摇角信号,角速度传感器传来的横摇角速度信号,水位传感器传来水舱边舱内水位的信号,经过控制中心计算机的处理,驱动相应气阀组关闭或开放,从而达到将水舱内的水关闭在向上运动的一舷的目的。

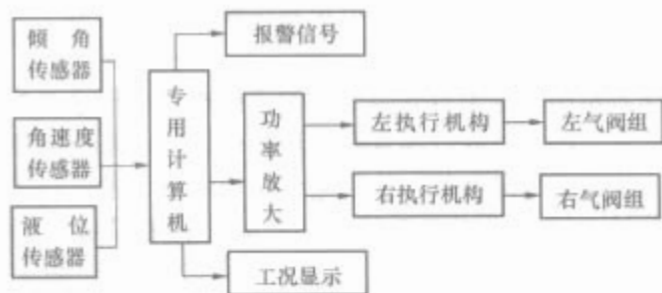


图 6.4-6 控制系统框图

控制中心一般由单片机或者可编程逻辑控制器(PLC)担任,主要负责数据的采集和处理,根据内置的程序发出相应的指令。程序一般分为三个工作方式:当波浪的周期小于船舶的自摇周期,此时水舱气阀组全部关闭,此方式一;当处于双谐摇状态时,气阀组全部开放,工作在纯被动水舱方式;此方式二;当波浪的周期偏离谐摇周期较大时,程序控制气阀组每个周期开关一次,使得水舱内水的横向流动相位和速度始终保持最佳稳定效果,即被动可控方式;此方式三:程序通过传感器来的信号综合判断,可以在该三种方式

间自动切换。

方式三的控制过程如图6.4-7所示。

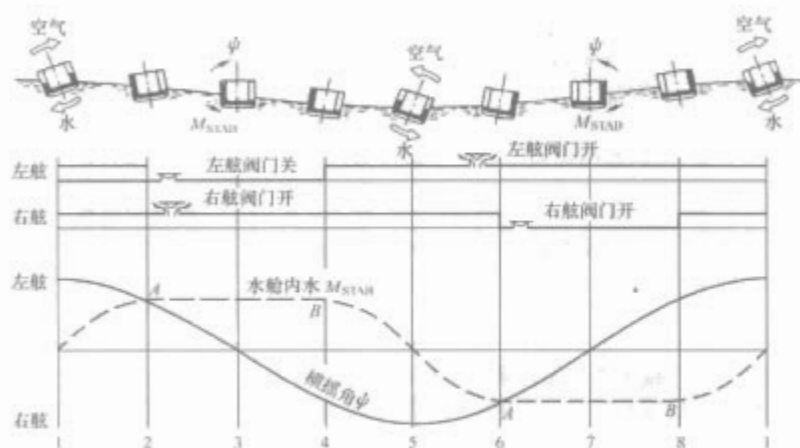


图 6.4-7 可控被动式水舱控制过程示意图

如图6.4-7所示,当水舱内的水在船体一侧的流动通道内达到最高位(位2和位6)时,气阀关闭,水被截止,以便在较长的摇摆周期内将平衡力矩维持一段时间,操作阀的开启信号自动确定在相应位4(左舷)与位8(右舷)。当船舶继续在位4(左舷)与位8(右舷)向上运动时,水便流向船体的另一侧,以便平衡摇摆力矩。根据摇摆周期的长短,控制相应气阀的关闭时间,达到可控的目的。

当海况恶劣时,水舱将工作在饱和状态,边舱的水将冲击顶板,这时系统将部分气阀组关闭,从而增加系统的阻尼,减缓水舱内水的运动,并发出报警信号。

控制系统中所需的传感器一般包括倾角传感器、横摇角速度传感器和测量边舱液位高度的液位传感器。其中倾角传感器和角速度传感器可选用现已成熟的压电陀螺或者光纤陀螺,体积小而且性能稳定。

执行机构主要是将控制中心的指令通过功率放大驱动气阀组动作,从而实现对水舱的可控。在程序正常运行时,实现气体阀组的开闭;在系统故障情况下,将全部阀组全部关闭,防止发生危险。

工况显示部分可以实时显示水舱内的液位、横摇角度、角速度等运行数据,便于船员了解水舱的运行情况,决定什么情况下投入或者退出水舱可控程序的运行。

3 船用稳定平台电气控制

3.1 船用稳定平台

船用稳定平台在舰船上有广泛的应用,通常作为船上多种特装设备如雷达、经纬仪、光学设备、专用测试设备等提供稳定的水平基座,平台被看作为船舶上的二级稳定装置。它的基准信号由船上的平台罗经,惯导平台或专用倾角传感器提供。

稳定平台伺服系统的总体型式一般有机-电伺服系统和机-电-液伺服系统,系统特性比较见表6.4-1。

表 6.4-1 稳定平台伺服系统特性比较

类型	机-电伺服系统		机-电-液伺服系统
	直流系统	交流系统	
执行元件	直流伺服电动机 直流力矩电机	交流伺服电动机 交流力矩电机	往复式直线油缸 转叶油缸 油马达
功放元件	直流功率放大器	交流功率放大器 变频调速器	伺服放大器 +伺服阀或比例阀 伺服放大器+伺服 阀或比例阀+变量泵

续表			
类型	机-电伺服系统		机-电-液伺服系统
	直流系统	交流系统	
测角元件	光电编码器 旋转变压器 (编码器) 精密电位器	光电编码器 旋转变压器 (编码器) 精密电位器	光电编码器 旋转变压器 (编码器) 精密电位器
其他反馈元件	测速发电机 (测速反馈)	测速发电机 (测速反馈)	测速发电机 (测速反馈) 压力传感器 (压力反馈)
专用设备	减速器(如若采用力矩电机,在力矩足够大时可將力矩电机与稳定轴直联)		液压站
低速平衡性	好		好
稳定精度	高		高
本体结构	如若加减速器,则结构较复杂		结构简单
主要问题	电磁兼容性		(1) 管路漏油 (2) 伺服阀对油的清洁度要求很高,容易堵塞 (3) 油液柔性造成的液压谐振频率低且阻尼系数很小,给回路稳定性设计带来困难

图 6.4-8 和图 6.4-9 分别为电动机与伺服阀、转叶油缸驱动的稳定平台伺服系统,它们都是典型的闭环位置控制系统,由角度测量器件,计算机,放大器,伺服电动机、减速齿轮箱或伺服阀、转叶油缸和平台等环节组成。

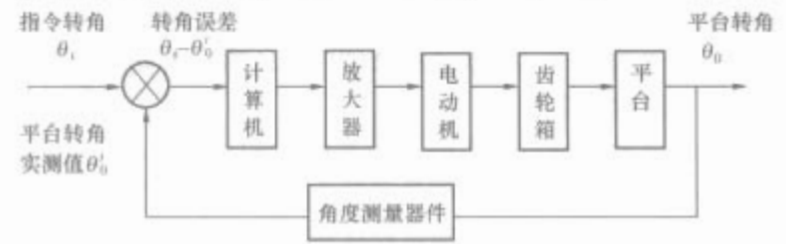


图 6.4-8 电动机驱动的稳定平台
伺服系统框图

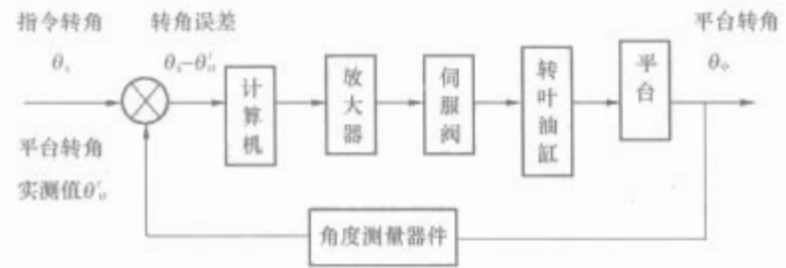


图 6.4-9 伺服阀、转叶油缸驱动的稳定平台
伺服系统框图

船舶摇摆时,其摇摆角 θ_i 由船上基准平台测出,作为平台伺服系统的指令转角与平台转角实测 θ'_0 。在计算机内比较后得转角误差 $\theta_i - \theta'_0$,经处理后转换成模拟量信号,送伺服放大器进行功率放大后驱动电动机转动、通过减速齿轮箱(或伺服阀、转叶油缸)带动平台,直至平台实测转角 θ'_0 与指令转角 θ_i 相同,使稳定平台与基准平台一样相对地球坐标保持水平。

电动机驱动的稳定平台在船上应用较普遍。

3.2 稳定平台系统的基本组成

稳定平台系统由电控设备和机械装置两部分组成。电控设备包括配电设备、控制设备、操作面板等;机械设备有负载,内外框架组件(包括电动机、齿轮箱或转叶油缸等驱动机构及锁紧机构、反馈机构等设备),安装机座及附件等。对于机-电-液伺服系统还有一套由油泵、电动机、伺服阀(或比例阀)、油箱、若干其他阀件、压力表和传感器等器件组成的泵站及其运行操作设备。

3.3 平台的精度与结构设计

用户对平台最基本的要求是跟踪精度。平台在消除船舶摇摆影响时因跟踪滞后引起偏差,此外,安装在甲板上的平台由于受风力矩作用而产生位置偏移。船上的稳定平台大多要求有较高的精度,不但要有一个好的控制系统设计和元器件选择,同时还应有一个好的结构设计,把握好设备制造、安装和系统调试各环节的工作。

和大多数自动控制系统一样,平台性能的好坏首先的而且是主要的取决于结构设计和加工质量,因此必须对结构设计予以足够重视。装置的主要结构件都必须保证具有足够的刚度,它可以用平台运动部件的质量、转动惯量与系统刚度组成的结构谐振频率来表征。系统的结构谐振频率可考虑为控制回路截止频率预期值的 5~10 倍,否则平台运行时或船体振动将会不断地激发机械谐振,无法保证平台的精度。对于过低的结构谐振频率,虽然依靠控制策略的调整,也能部分解决稳定性问题,但运行性能不会好,同时对于经常受扰于振动状态下的薄弱环节容易因疲劳而断裂。在整个结构中,负载的支撑结构,支撑结构与平台的连接,框架、框架的支撑、框架与驱动机构的连接,齿轮减速器的布局 and 支撑,整个驱动机构的支撑等都有可能是整个结构刚度的薄弱环节,应该从方案布局上以及在强度许可范围内缩小结构尺寸和改变具体部件的结构形式等方面着手来改善部件刚度,尽可能避免采取扩大尺寸或增加重量的方案,因为那样很可能导致恶性循环,使结构性能反而下降。

外力干扰将影响控制系统精度,设法减小外力干扰作用是系统设计的一个主要问题,运动部件的不平衡力矩是外力干扰之一,在结构设计时应使运动部件的质量中心与转轴中心重合,并预留配重空间待整机(带全负载状况)调试时确定,预留的配重量尽量少。配重时可使其重心略低于平台稳定轴。

许多船用稳定平台安装于船的上甲板,要经受海浪、盐雾、风雪、雨水、高低温等恶劣环境的影响,系统的各组成部分(特别是检测元件、执行电动机或油缸、油马达等)均要采取相应措施。不可低估风的影响,有的设备有时要在 60m/s 或更大相对风速下正常工作。一个有效风阻面积为 10m² 量级的设备所受的风压力最大值可能达到几吨,它对平台稳定轴所造成的干扰力矩会占据显著的地位。

在条件允许情况下就应尽可能将稳定平台安装于靠近船舶摇摆中心的地方,因为船的摇摆将在稳定平台上产生附加惯性力,造成纵、横向平动过载和升沉过载。对系统而言,这也是一种不可小视的干扰力矩,对系统的稳定性和稳定精度都有不可忽视的影响,其大小与平台离摇心距离成正比。

稳定平台多数采用内外环框架结构形式,摆幅的大小要满足技术规格书要求,并留有适当裕度。在结构设计上还应考虑安装锁紧机构,以便平台不工作予以锁定固牢,框架锁

紧后不应有运动间隙,否则将可能造成齿轮的齿面损坏,同时设计时应考虑有机械极限和电气极限保护。

3.4 设计准备阶段应确定的主要技术指标与接口关系

这些数据应有:

- (1) 稳定精度。
- (2) 保精度工作角度。船舶横摇角度和周期,船舶纵摇角度和周期。
- (3) 稳定平台负荷及结构参数。台面负载质量,负载外形尺寸,负载与台面间接口尺寸,负载质量中心位置,有无可动负载,平台及相关设备的外形尺寸,最大重量范围等。
- (4) 环境条件与适用规范。
- (5) 信号传输的物理接口和通信协议。
- (6) 电源、水源条件等。

3.5 电动机的选择

从框图 6.4-8 可知,电机驱动的稳定平台伺服系统设计需要解决的首要问题是选择电动机和相匹配的齿轮箱。

由于直流伺服电动机理想的调速性和机械特性,在稳定平台伺服系统中被广泛应用。电动机的选择应考虑的因素主要有电动机的额定转矩、功率、最大转矩、最大转速、低速平稳性等,此外还应考虑使用的环境条件和电刷及换相器磨损等。

作用在平台上的负载总转矩包括风力矩、不平衡力矩等和加速时克服负载及电动机惯量所需转矩,见式 (6.4-5)

$$T_0 = T + \ddot{\theta}(J_L + i^2 J_d) \quad (6.4-5)$$

负载总功率包括恒速时克服负载转矩和加速时克服负载及电动机惯量所需功率。见式 (6.4-6)

$$P = T\dot{\theta} + \ddot{\theta}\dot{\theta}(J_L + i^2 J_d) \quad (6.4-6)$$

上二式中: T_0 为负载总转矩; P 为负载总功率; T 为负载转矩; $\dot{\theta}$ 为负载所需转速; $\ddot{\theta}$ 为负载所需角加速度; J_L 为负载的转动惯量,包括齿轮组的转动惯量; J_d 为电动机的转动惯量; i 为齿轮组的减速比。

电动机的功率应大于负载总功率。在计算时负载所需转速以正常工作时的最大转速计,负载所需角加速度则需满足系统快速性要求,而在初步计算时可不计齿轮组的转动惯量。

采用磁钢励磁的直流力矩电机因结构紧凑,输出力矩大被广泛应用于各类稳定平台伺服系统中。与电枢控制直流电机一样,其传递函数见式 (6.4-7)

$$W(s) = \frac{\dot{\theta}(s)}{U(s)} = \frac{1/K_e}{(T_d s + 1)(T_m s + 1)} \quad (6.4-7)$$

式中: $T_d = L/R$ 为电动机的电气时间常数, s; $T_m = RJ_m/K_e K_M$ 为电动机的机电时间常数, s; R 为电枢回路总电阻,包括电枢电阻和伺服放大器输出阻抗, Ω ; L 为电枢电感, H; K_e 为反电动势常数, V/(rad/s); K_M 为电动机的力矩常数, N·m/A。

电动机的电气时间常数 T_d 可根据制造厂提供的产品资料、伺服放大器输出阻抗数据确定。电动机的机电时间常数可根据制造厂提供的产品资料按式 (6.4-8) 求取

$$T_m = J_m \dot{\theta}_{m0} / M_{m0} \quad (6.4-8)$$

式中: $\dot{\theta}_{m0}$ 为电动机的空载转速, rad/s; M_{m0} 为电动机的堵转力矩, N·m。

3.6 齿轮减速比的选择

减速齿轮箱可放大力矩,减小电动机轴的转动惯量而提高系统快速性,但同时也增加了装置重量、结构复杂性和制造成本。加齿轮箱后电动机轴上转动惯量约为式 (6.4-9) 所示

$$J'_m = J_m + J_L/i^2 \quad (6.4-9)$$

式中: J'_m 为带负载后电机轴上转动惯量(未计齿轮箱本身的转动惯量); J_L 为负载转动惯量; i 为齿轮箱减速比。

合适的电动机和减速比选择原则应是:

- 1) 电动机能以所需的最大速度驱动负载。
- 2) 电动机转矩能使负载达到所需的加速度。

在给定的转矩下使加速度最大的减速比约为 $i = (J_L/J_m)^{1/2}$ 。

3.7 运动部件机械谐振的影响

齿轮箱输出轴、框架、负载一起组成一个机械谐振体,电动机、齿轮箱驱动弹性负载的示意图如图 6.4-10 所示。

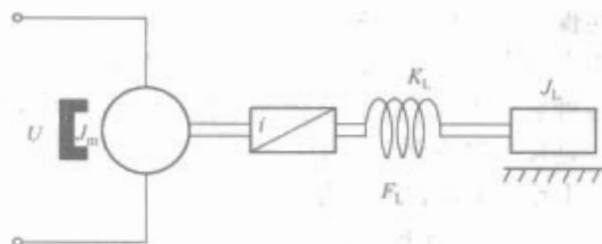


图 6.4-10 电动机、齿轮箱驱动弹性负载示意图

在不计传动损失情况下,负载转角与电动机输出轴转角间传递函数为式 (6.4-10)

$$\frac{\theta_o(s)}{\theta_m(s)} = \frac{\frac{K_L}{iJ_L}}{s^2 + \frac{F_L}{J_L}s + \frac{K_L}{J_L}} = \frac{\omega_{nL}^2/i}{s^2 + 2\zeta_L\omega_{nL}s + \omega_{nL}^2} \quad (6.4-10)$$

式中: K_L 为输出轴刚度; F_L 为负载阻尼; $\omega_{nL} = \sqrt{K_L/J_L}$ 为输出轴谐振频率; $\zeta_L = \frac{1}{2} \frac{F_L}{\sqrt{K_L J_L}}$ 为输出轴无因次阻尼系数。

同平台系统中其他主要结构件一样,齿轮箱输出轴、框架与负载组合体的谐振频率应大于系统频带宽度 5 倍。

3.8 角度测量器件和伺服放大器选择

对于精度要求不高的平台或位置伺服系统,角度测量器件可选用电位器。如果设计得当,位置误差可达 $10' \sim 20'$; 而位置误差小于 $10'$ 的平台或位置伺服系统的角度测量器件通常用高精度的编码器。其精度通常应高于平台精度一个量级,或稍高于指令信号的精度。

市场上有许多用于驱动伺服电机的伺服放大器,用户可根据需要选择。

3.9 若干细节与现场调试

齿轮齿隙在制造中不可避免,它相当于在电动机和负载间加入了一个变弹性系数 (K_L) 的弹性体 (F_L),在系统中加入了一个如图 6.4-10 所示的变参数的振荡环节,使系统频带变窄,品质变坏,误差增大。不同功率和精度要求的系统可采取不同的方法来减小齿隙影响,如适当增加库仑摩擦、将末级小齿轮做成两个并在安装时加予应力、替加平衡

弹簧等,另一最常用的做法是在控制系统中引入电动机的速度反馈来抑制振荡。

电气干扰也是令人讨厌和常见的问题,通常的处理方法是将小信号线与其他电气线路隔离并屏蔽,将控制信号线与船上动力线路隔离并屏蔽,同时设备的接地应集中、良好。

库仑摩擦可抑制齿隙引起的振荡,但也会造成低速运行不平稳,可通过在控制信号中引入不影响系统精度的颤振信号,但也会造成运动部件磨损。

一个理想的系统品质还决定于现场调试,在设计伺服放大器电路时,应设置可调电路。如放大器增益、PID 调节器参数调节电路,同时应留出空间,以便在系统中插入有关校正电路和前馈控制电路。

4 船舶调距桨装置电气控制

船舶调距桨系统是船舶动力推进系统的重要组成部分,也是其最基本的组成部分。由于调距桨能在所有工况下充分吸收主机的全功率,提高螺旋桨效率,在部分负荷时可实现螺旋桨与主机转速的最佳匹配,并易于实现遥控,因而已在多种船舶上得到广泛应用。另外调距桨可以按照船舶航行的要求,在保持主机转速与转向不变的情况下,通过调节螺旋桨的螺距角度来改变船舶的航速以及正倒车状态,达到改善船舶在各种航行工况下的推进效率,提高船舶的可操作性和机动性,延长主机寿命。目前,调距桨已广泛应用于拖船、挖泥船、中型交通运输船、海洋调查船等多种船舶上。现以某一艘 1000 吨级挖泥船调距桨装置为例予以说明,该船为双机双桨推进结构。

4.1 船舶调距桨装置系统组成

调距桨装置是集机械、液压、电气为一体的伺服控制系统,通常每一套调距桨装置由以下几部分组成:

- (1) 桨毂和桨叶。
- (2) 轴系、联轴器和双油管。
- (3) 配油器,其功能是把液压油经配油机构传递给桨毂油缸。
- (4) 液压系统,包含泵、阀组、油箱以及必要的管路连接。
- (5) 电控系统,主要用于调距桨螺距、主机转速和主机负荷的控制及显示、报警等。
- (6) 螺距发讯器,主要功能是给出桨毂螺距位置的反馈装置。

4.1.1 液压系统

通常一套调距桨装置的液压系统包括一个泵站和一个重力油箱,一台气液应急泵。液压系统接受电控系统的指令工作,并提供伺服油缸调节螺距所需的动力源。每个泵站包括两套泵装置(互为备用)、一套阀组和一套仪表盘组件、两套压力管路过滤器、一套回油过滤器组成。系统原理图见图 6.4-11。

4.1.2 螺距发讯器

螺距发讯器通常装在配油器上,为电气控制提供桨叶螺距位置的反馈信号。螺距发讯器上装有零螺距开关凸轮,当螺距处于零位时,输出螺距为零位置的指示信号。

4.2 调距桨装置的电气控制

船舶调距装置电控系统的主要功能是发出调距控制指令和接收螺距发讯器的反馈信号,经计算机运行处理后,输出控制阀的信号,以实现桨叶螺距的连续精确控制,调距装

置电气系统左右各一套,图 6.4-12 为调距装置电气控制原理图。在图 6.4-12 中,调距装置的电气控制分为就地控制和远程遥控两种方式,在就地控制模式下,螺距控制采用就地按钮控制方式,有正车按钮和倒车按钮,用以控制电磁阀动作,从而达到控制螺距的目的;在远程遥控方式下,系统采取闭环控制模式,此时操纵手柄发出正车或倒车信号,与螺距反馈信号一起送入计算机进行闭环控制,用以控制比例阀动作,从而达到精确控制螺距的目的,另外系统同样可以采用按钮操纵方式,此时正车按钮或倒车按钮控制电磁阀动作,完成螺距控制目的。

在调距桨装置电气控制中,为完成既定的控制任务,电气控制系统通常由以下部分组成:驾驶室控制板、集控室控制板、变压器箱、油泵电动机起动箱、中心控制箱、机旁螺距控制箱、螺距发讯器等,对于机桨联控型调距装置,还应包含负荷控制板、转速控制板等部分。

4.2.1 驾驶室和集控室控制面板

驾驶室控制板和集控室控制板作为调距装置遥控的主要场所,其位置控制权由“驾驶室/集控室”转换开关完成,图 6.4-13、图 6.4-14 分别为调距装置驾驶室和集控室控制面板。在控制面板上有随动操纵手柄,用以发出控制指令,信号经计算机处理并依据联控曲线,输出螺距和主机转速的控制信号,以实现机桨的联合控制。在控制面板上,设有单独转速控制按钮和恒转速按钮,单独转速控制按钮的作用是使得随动手柄仅输出螺距控制指令信号,主机转速信号由转速控制板输出;恒转速按钮的作用是螺距控制同样由随动手柄输出指令信号,而主机转速信号则由计算机输出固定转速信号。另外,控制面板上还设有备用控制按钮,其作用是可以控制操作正/倒车按钮,直接控制电磁阀,对螺距进行控制。

4.2.2 变压器箱

变压器箱的设计原理是将船用交流 380V 转变为直流 24V,为调距装置电气控制提供控制电源。

4.2.3 油泵电动机起动装置

油泵电动机起动装置主要为液压系统的泵站三相电动机提供电源、本地起停和遥控起停等设置。油泵电动机起动装置包括油泵电动机起动箱和遥控起动板两部分,油泵电动机起动箱实现电动机的本地起停;遥控起动板实现集控室电动机遥控起停。油泵电动机起动装置设置有时间继电器和压力开关,实现当液压泵站的一个机组油压失电压时,时间继电器延时后压力开关实现备用电动机的自动切换。

4.2.4 机旁螺距控制箱

机旁螺距控制箱为调距装置螺距就地控制而设置,在机旁螺距控制箱上有本控/遥控选择开关、正/倒车按钮、螺距指示表。

4.2.5 中心控制箱(中心控制单元)

中心控制箱为调距装置电气控制的集中控制的地方,是整个电气控制的“大脑”。中心控制箱通常包含信号调理板、继电器、信号隔离模块、接线端子等。

中心控制箱作为整个调距装置电气控制的核心单元,需完成以下任务:

- 1) 完成电气控制内部信号以及监控、主机等外部信号等输入、输出信号的综合处理。
- 2) 输出调距装置各种综合故障报警。
- 3) 对螺距发讯器反馈指示信号进行处理,输出螺距指示表信号。
- 4) 处理调距装置螺距指令、螺距反馈信号的输入输出。

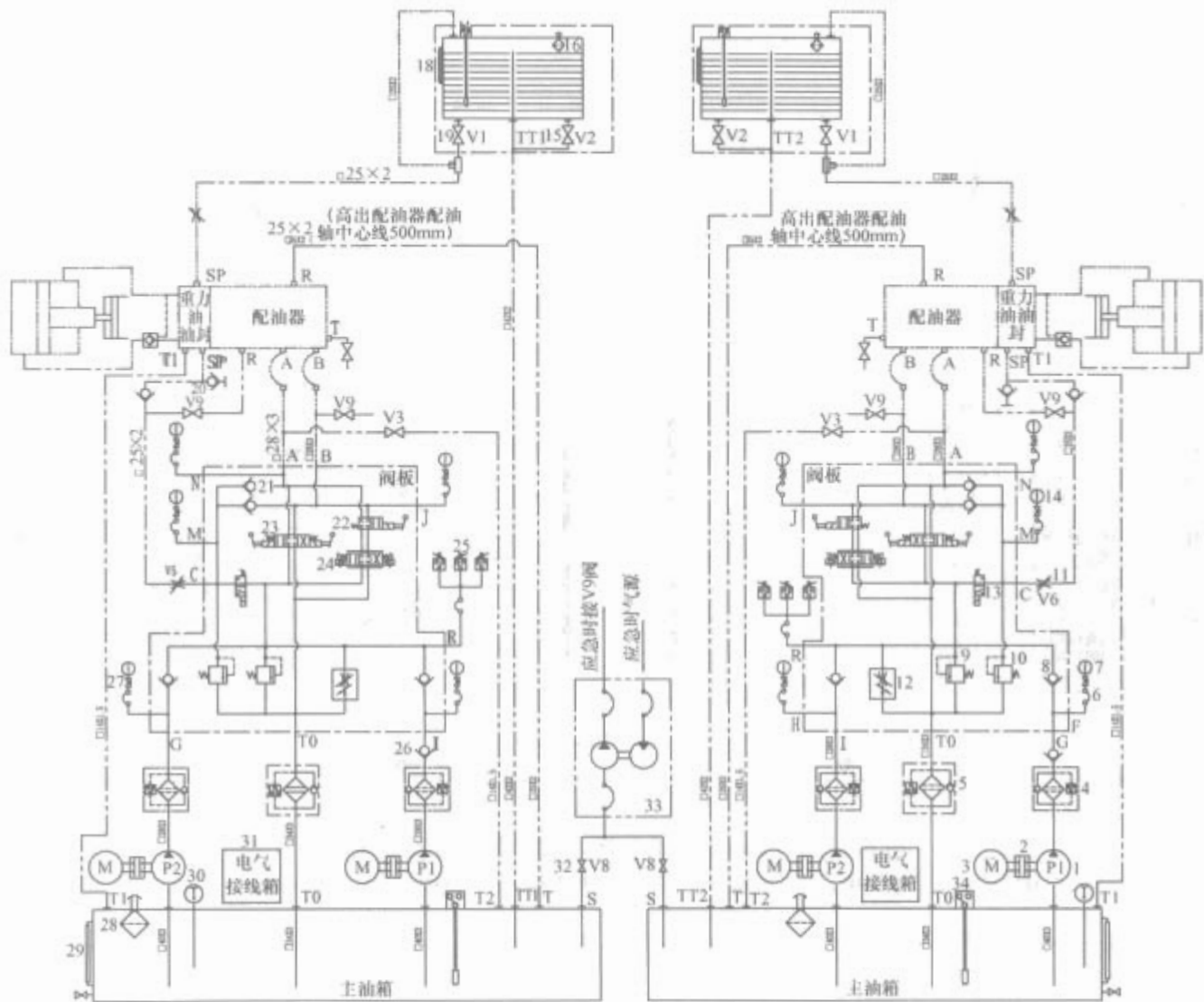


图 6.4-11 液压系统原理图

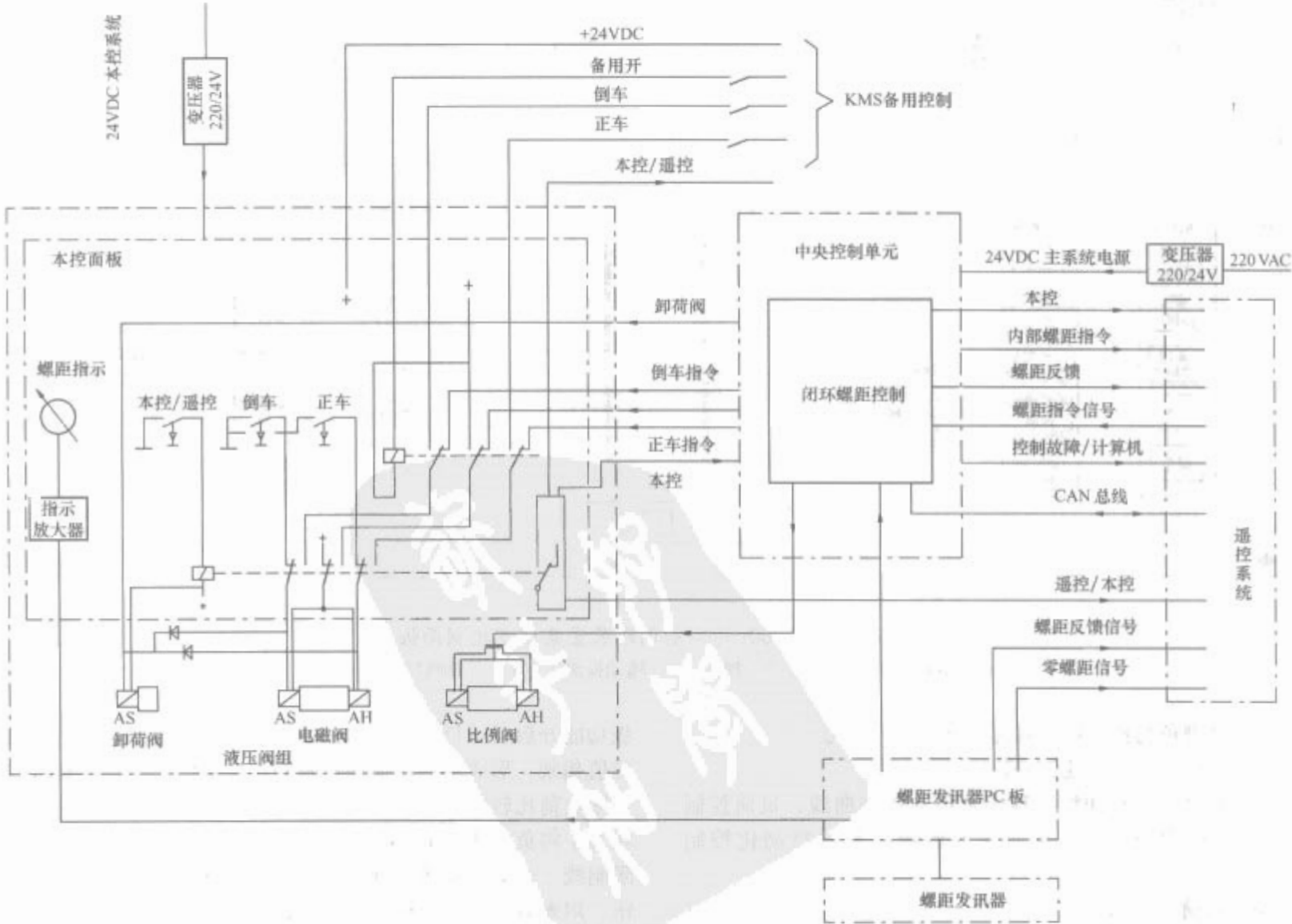


图 6.4-12 船舶调距装置电气控制框图

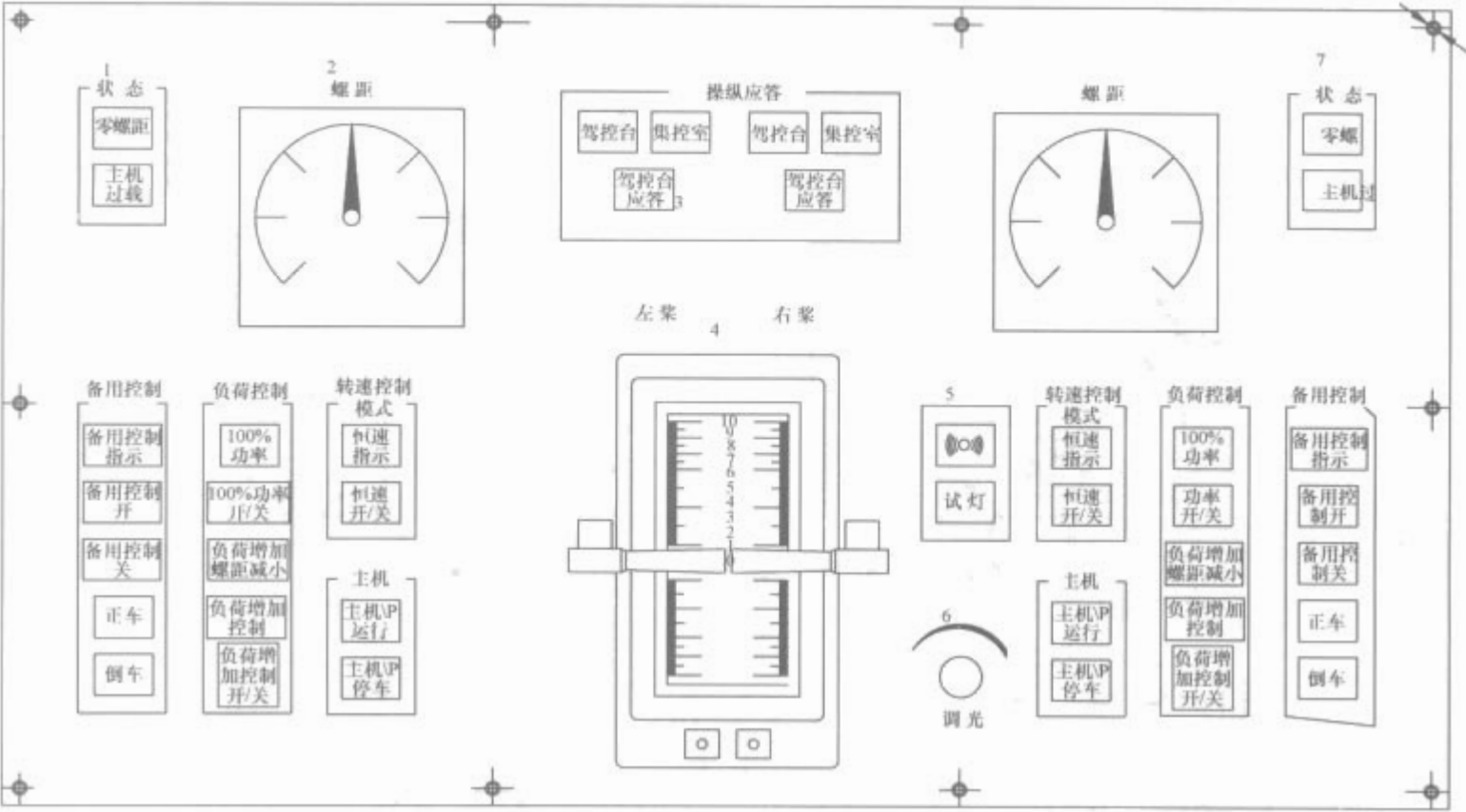


图 6.4-13 1000t 挖泥船调距装置驾驶室控制面板

1—指示灯；2—螺距表；3—按钮；4—随动操纵手柄；5—蜂鸣器；6—调光器；7—面板

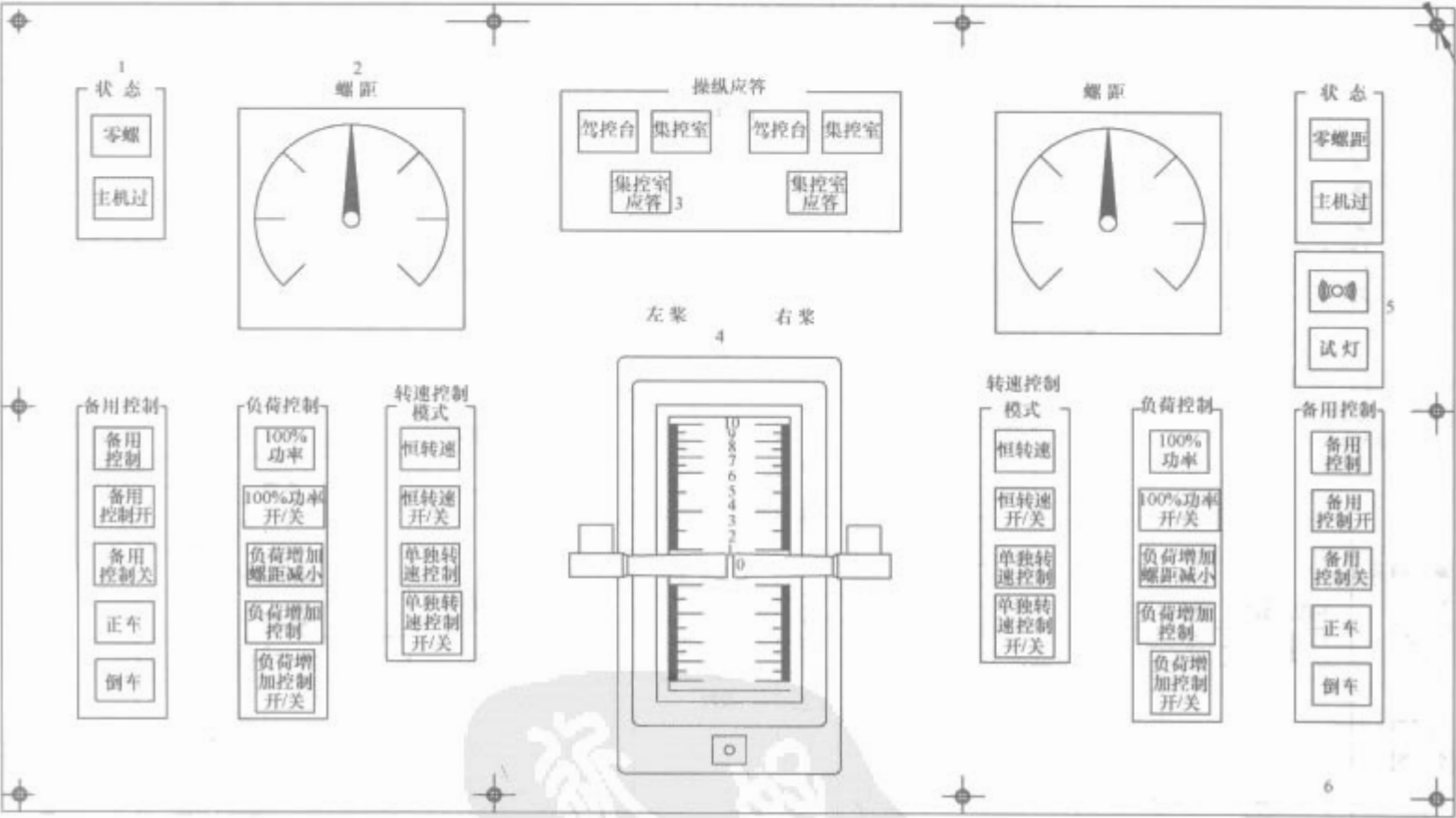


图 6.4-14 1000t 挖泥船调距装置集控室控制面板

1—指示灯；2—螺距表；3—按钮；4—随动操纵手柄；5—蜂鸣器；6—面板

5) 处理负荷控制板、转速控制板输入信号。

6) 提供主机的转速信号输出。

7) 对机桨联控曲线、螺旋桨单独控制曲线、负荷控制曲线等进行程序处理，从而完成调距桨装置自动化控制功能。

4.2.6 负荷控制板

负荷控制板主要为机桨联控型船舶的负荷控制功能而设置，负荷控制板设定为 0~110% 共 12 个挡位。当负荷控制

板功能开启时，负荷限制理论线则必须与负荷控制板当前挡位值相乘，形成新的负荷理论限制线，以作为负荷控制时与实际负荷比较的主机过载限制线。因此可以说，负荷控制板相当于将负荷限制理论线变成了一簇（12 条）平行的负荷限制线。在集控室和驾驶室控制板上均设有 100% 功率按钮，用来对负荷控制板功能进行越控，当任何一处 100% 功率功能起动，负荷控制板功能就不再起作用，而只按实际负荷理论限制线进行负荷限制。

4.2.7 转速控制板

转速控制板为单独转速控制模式时主机遥控转速信号输出而设置，其输出的指令信号经可编程序控制器（PLC）处理后用于主机的转速控制信号。

4.2.8 螺距备用控制系统

螺距备用控制系统是独立于主系统的一个非随动系统，是主系统的补充。当主系统发生故障时，则使用备用系统。

备用控制系统由下述部件组成：

- 1) 备用控制系统的“开关”按钮。
- 2) 备用控制系统“开”指示灯。
- 3) 螺距“正车”、“倒车”按钮。
- 4) 中央控制单元（中心控制箱）内的备用系统转换继电器。

4.2.9 螺距电气控制故障报警

为了保证船舶水上航行安全，船舶调距桨装置设有电气控制故障报警功能，当系统发生故障时，故障信号会通过电气连接传递给监控系统，并发出声光故障报警信号。

电气故障报警分为传感器报警和继电器报警两种。对于不同的船舶设计，对于故障的报警点设置也不同。1000t 挖泥船故障报警设置见表 6.4-2。

表 6.4-2 故障报警设置			
序号	报警点名称	设定参数范围	报警形式
1	系统油压低报警	$\leq 1.2\text{MPa} \pm 0.2\text{MPa}$	压力传感器
2	调距桨装置失效报警	$\leq 0.6\text{MPa} \pm 0.2\text{MPa}$	继电器

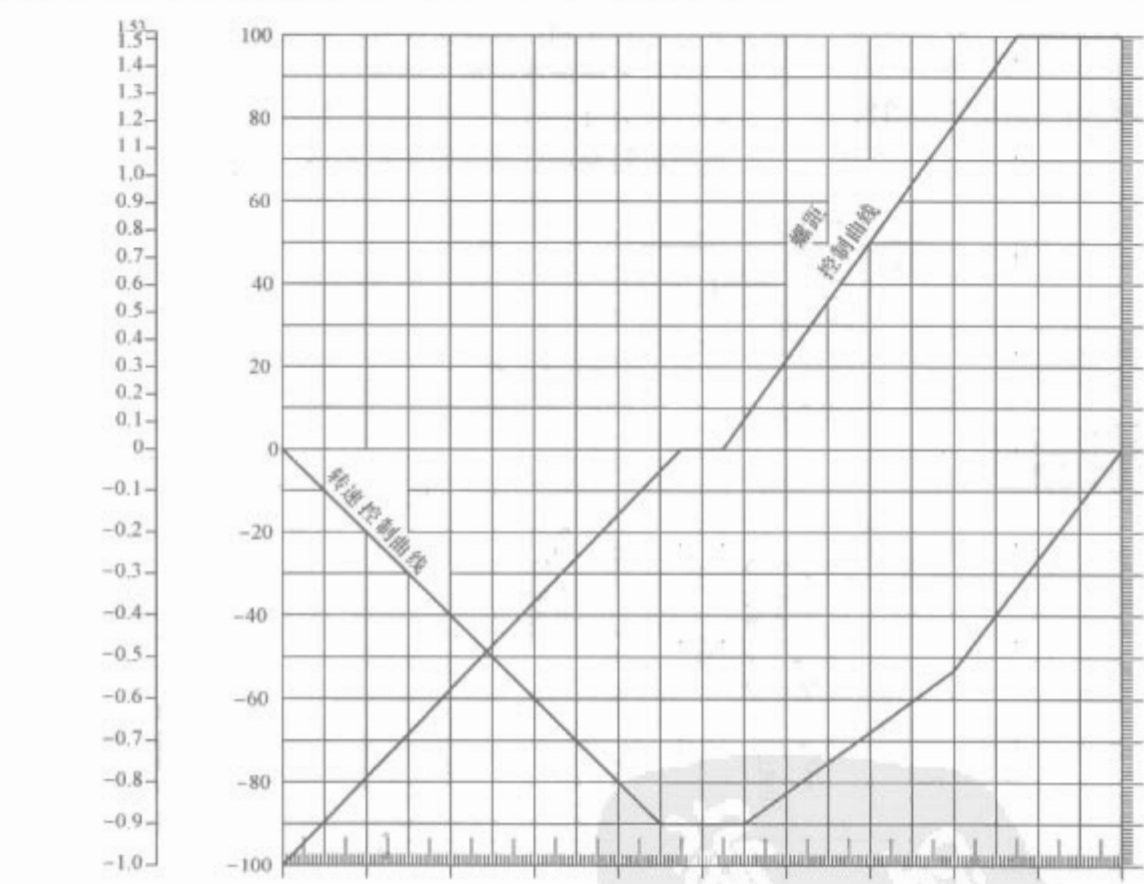


图 6.4-15 螺旋桨螺距单控曲线

备用控制方式时，打开“备用控制开”开关，主控方式失效，此时，采用驾驶室或集控室的正/倒车按钮进行螺距控制，经由 PLC 控制液压系统电磁阀和卸荷阀动作，驱动机械滑块进行调距。

就地控制时，将机旁螺距控制箱开关选择“本控”位置，此时遥控方式失效，使用机旁螺距控制箱上的正/倒车按钮进行螺距控制，控制继电器组输出状态，驱动液压系统电磁阀和卸荷阀动作，达到调距的目的。螺距控制原理框图见图 6.4-16。

4.3.2 柴油机控制

柴油机（主机）转速控制也有 4 种方式：①主控，即用

续表

序号	报警点名称	设定参数范围	报警形式
3	主油箱油位低报警	$(245 \pm 50)\text{mm}$	液位传感器
4	重力油箱油位低报警	$(200 \pm 50)\text{mm}$	液位传感器
5	液压系统油温高报警	$(64 \pm 4)^{\circ}\text{C}$	温度传感器
6	滤器堵塞报警	—	压力传感器
7	控制电源故障报警	—	继电器
8	控制系统故障报警	—	继电器

当控制系统故障时，螺距锁定不变，而手柄仍可正常控制主机转速。为了航行安全，此时一般转入单独转速控制模式。

对于以上报警点，监控系统在集控室设置有显示报警和蜂鸣器报警，在机电长室和驾驶室设有延伸报警。

4.3 船舶调距桨装置的控制方式

4.3.1 螺距控制

螺距控制有三种方式：①主控，通过可编程序控制器进行控制；②备用控制，用开关按钮进行控制；③应急控制，在就地采用本控模式。

主控方式时，螺距控制规则由单控曲线决定，此时，由驾驶室或集控室操纵手柄发出控制指令，螺距发讯器反馈螺距信号，经过 PLC 处理，按单控曲线函数关系输出模拟电流信号，控制液压系统比例方向阀阀芯开度，进行闭环螺距控制。图 6.4-15 为调距桨螺距单控曲线。

转速指令 V/P	mA 轴转速	主机转速
	r/min	r/min
20	342	1800
	330	1700
	320	1600
	310	1500
	300	1400
	290	1300
	280	1200
	270	1100
	260	1000
	250	900
	240	
	230	
	220	
	210	
	200	
	190	
	180	
	170	
	160	

驾驶室或集控室操纵手柄控制，此时手柄指令被 PLC 拆分成主机和螺旋桨两个指令信号，按照机桨联控曲线输出主机控制电流信号，送给柴油机电子调速器，达到控制主机的目的；②恒转速控制，此时 PLC 输出一个恒定电流信号送给电子调速器，主机以恒定转速运行；③单独转速控制，用电位器控制，通过转速控制板输出主机控制信号；④应急控制，在就地直接控制调速器。主机转速控制原理框图见图 6.4-17。

4.3.3 负荷控制

负荷控制的目的是防止主机过载。超负荷可能发生在恶劣的海况下，或发生在机动航行时。为此要检测柴油机的转

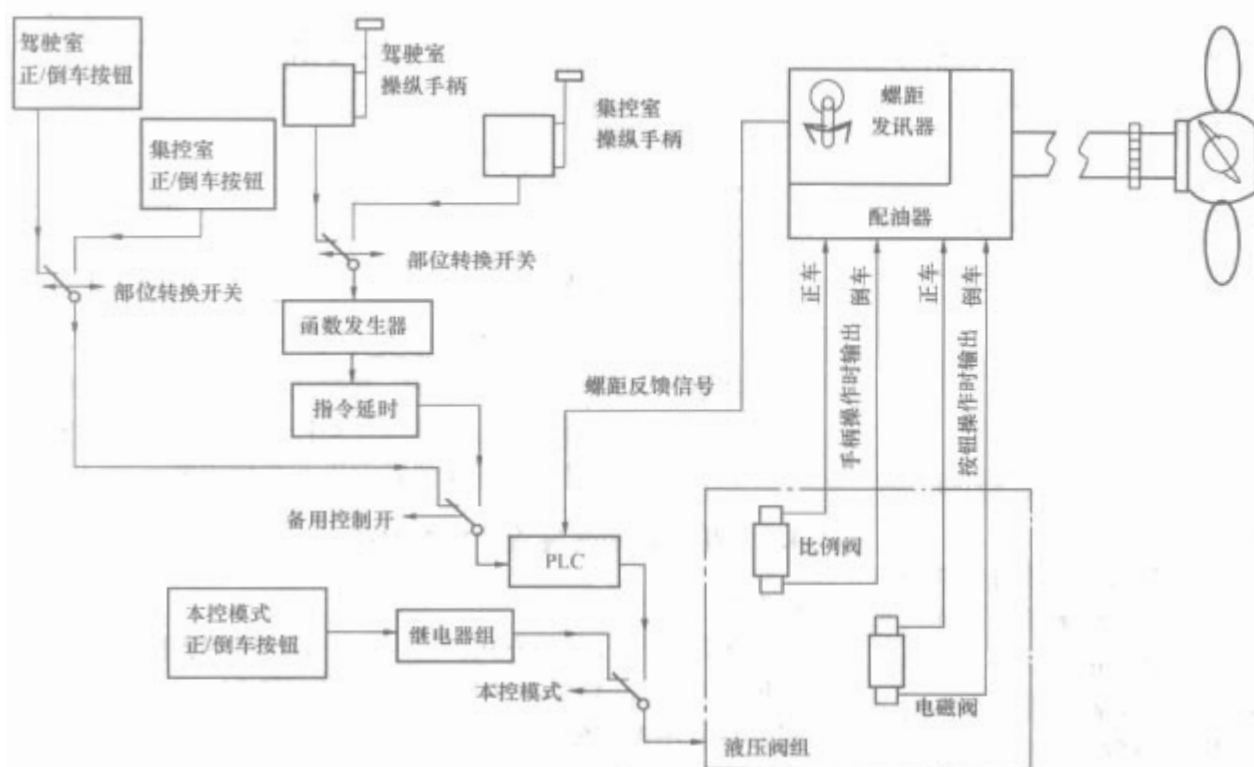


图 6.4-16 螺距控制原理图框图

速和负荷，并与预校准的负荷曲线比较。转速和负荷这两个参数指示了柴油机相对负荷曲线的状态，为了把测得的状态调节到接近于负荷曲线的理想状态，则需根据需要增大或减小螺距。这种负荷曲线，对不同的主机机型是不同的，因此需要预先在主机出厂试验时对主机做出模拟试验，初步确定负荷曲线大致状态，再根据船舶系泊航行试验调整实际的负荷曲线。

(slow-down) 信号越控。此时的负荷限制值为系统软件中的预定值。

如果负荷控制系统发生故障,控制系统会产生一个故障信号并自动转化到过载保护模式。在此模式下,主机安全系统的过载信号保证螺距将自动减小。

扫气压力过低也可作为过载信号自动减小螺距。
负荷控制原理框图参照图 6.4-18。

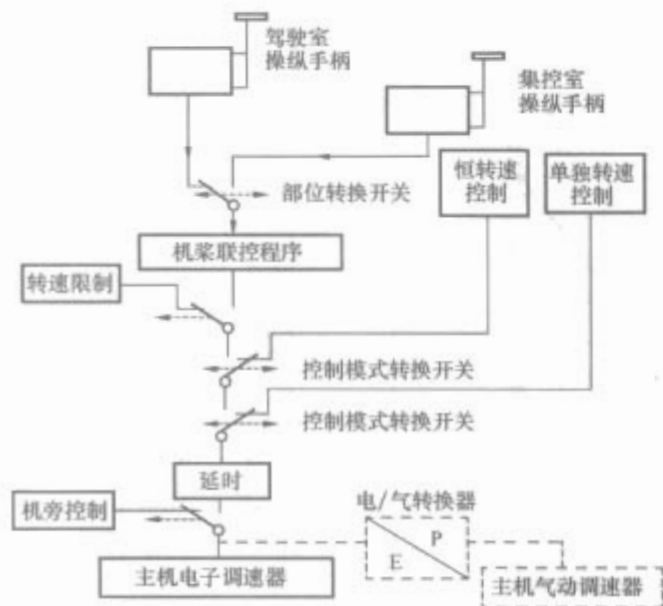


图 6.4-17 主机转速控制原理框图

4.3.4 螺距和转速的联合控制

螺距和转速的联合控制（机桨联控）是指用一个控制手柄同时控制螺距和主机转速，其目的是在整个运行范围内保持螺距和转速的最佳匹配，从而保证船舶推进有着较高的推进效率。在联控时，驾驶室或集控室控制面板上的操纵手柄发出控制指令信号，在 PLC 程序设计时，预先设定了机桨联控曲线，控制指令按联控曲线输出螺距和转速的控制信号。机桨联控曲线参照图 6.4-19。

5 舵桨装置电气控制

全回转舵桨 (Rudder Propeller) 是一种新型的船舶推

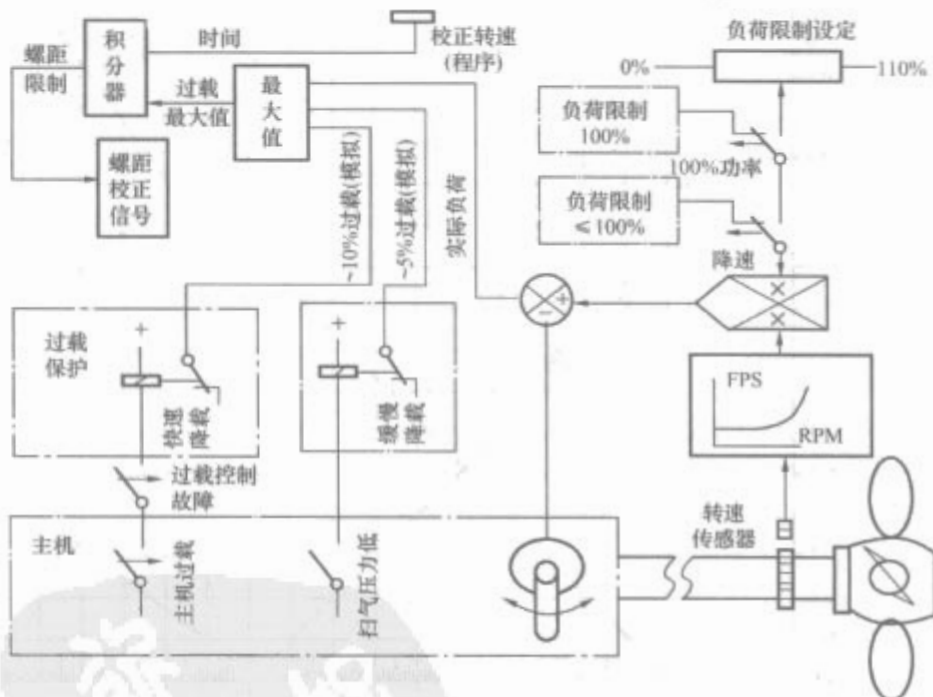


图 6.4-18 负荷控制原理框图

进装置,是以舵舵合一的方式替代传统的舵舵相互独立的推进方式,推进螺旋桨能绕其中间垂直立柱作 360° 旋转,通过控制推进螺旋桨的回转角度,提供全方位的推力,使船舶操纵更加灵活。一般舵桨装置的螺旋桨为定距桨(FPP),主要控制的是舵桨的回转角度——舵角控制。

5.1 舵桨装置系统组成

以苏州肖特尔公司的 SRP1010FP 型全回转舵桨装置为例, 一台 SRP1010FP 型舵桨包括以下部分:

- (1) 上齿轮箱。
- (2) 转舵齿轮箱。

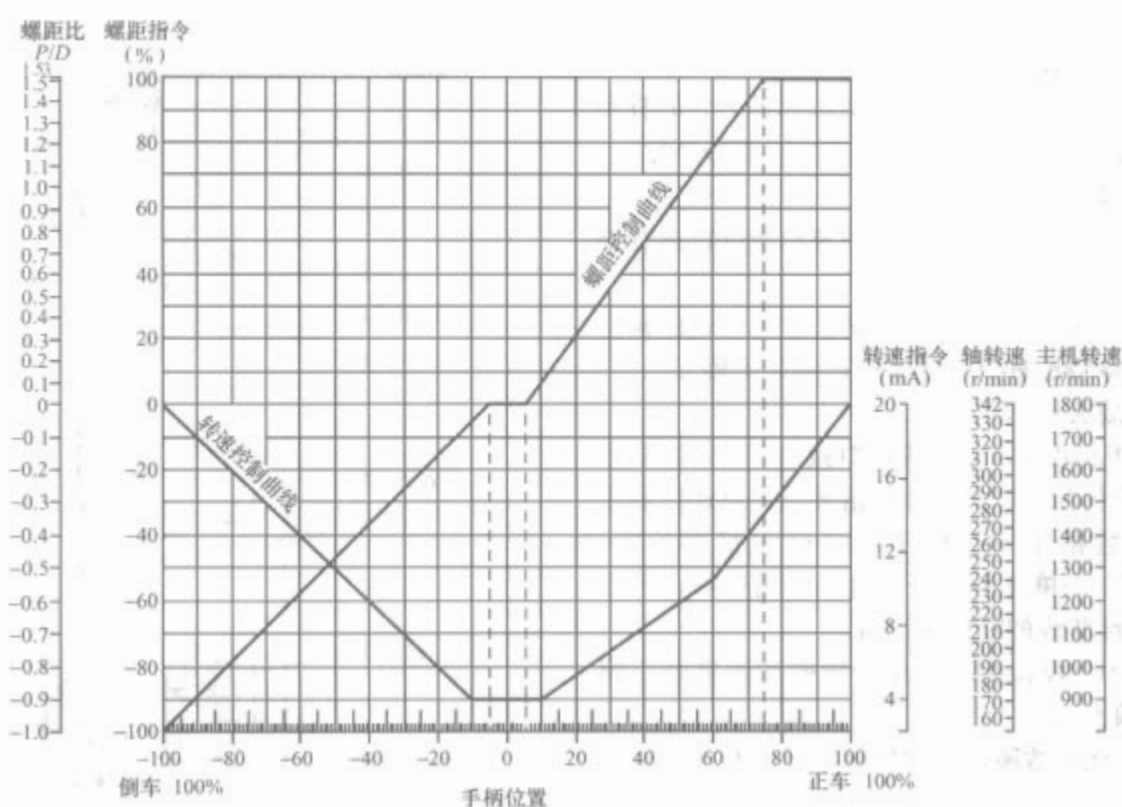


图 6.4-19 机桨联控曲线

(3) 带舵角发送装置的中间体。

(4) 带推进器的下齿轮箱。

上齿轮箱包含一对传递能量的右旋伞齿轮。在输入驱动轴上装有反转锁，保证舵桨装置按正常旋向运转。在上齿轮箱的输入轴上装有离合器，通过法兰直接与万向轴连接。

在上齿轮箱的下方装有一个锥形箱体，作为舵桨装置与船舶连接的支撑部分，箱体内包括轴部件和转舵齿轮机构。支撑锥体内还有转舵管筒，转舵管筒内有中间传动轴，连接上、下两对伞齿轮。

箱体中的转舵齿轮机构装有两个液压转舵马达，液压转舵马达的转舵扭矩通过行星减速齿轮传递给主转舵齿轮。转舵反馈发讯装置与下齿轮箱（推进器回转角）按 1:1 同步旋转。电子发讯器组件安装在法兰的顶部，发讯器组件还包含一个用于本地指示的推进方向指针。

下齿轮箱安装在转舵管筒的下端，包括一对传递驱动螺旋桨轴的右旋伞齿轮。螺旋桨轴通过多道水封和一道油封进行密封，与密封相匹配的密封套为防腐、防水材料。为了保护轴密封不受外来物质及绳网的破坏，在下齿轮箱与桨毂之间安装有一环形保护装置。

5.2 舵桨装置操舵系统

就 SRP1010FP 型舵桨装置而言，该装置配备了一套电液随动操舵系统。

操舵系统的原理是通过调整命令单元的控制轮来预设舵桨的期望方位，即控制轮给定一控制指令，电控单元和液压操作系统驱动液压马达转动桨达到控制方位的目的。在电控系统操纵位置的推进方向指示器上可以显示舵桨的操纵方位。操舵系统速度与指令操舵角度的大小成正比，对于较大的转舵角，操舵响应速度较快，反之对于较小的转舵角，操舵响应速度较慢。

5.2.1 操舵系统的电控单元

5.2.1.1 电源

在舵桨装置电控单元中，通常需要提供下列规格的电源：

220/50Hz (5A) 主电源，由主开关板提供给主机舱的舵桨装置电控单元。

24V DC $\pm 20\%$ ，最大脉动 1V（最大 500W）直流电源，用于电控单元应急操作。

24V DC $\pm 20\%$ ，最大脉动 1V（熔断电流 2A）直流电源，从电控单元的开关盒提供给操舵台，作为推进方向指示器的应急电源。

5.2.1.2 操纵系统

(1) 360°全回转操舵系统。电子遥控全回转操舵系统从电位计上读取指令信号，电路板将指令信号与舵桨实际角度信号进行比较，并把角度差值传送给液压系统，控制液压系统动作。当指令信号与舵桨实际角度信号相等时，液压系统停止动作，操舵系统完成控制过程。

电路板包含具有故障检测和故障显示的功能。如果电路板检测到控制系统出现故障，会把“操舵故障”的信息传送给故障报警单元。

操舵系统包括随动操舵模式和实时操舵模式，系统提供模式自动转换功能。

如果在实时操舵模式下电源发生故障，操舵系统会将“实时操舵模式故障”传送给报警单元。

(2) 主机速度控制。主机速度控制是一个随动遥控系统。在全回转舵桨装置中，速度控制杆集成于操舵室的舵桨指令单元。由电控单元提供 4~20mA 的直流模拟信号给主机的电子调速系统，电流的大小是通过舵桨指令单元上的速度控制杆带动电位计来实现的。

由于涉及主机速度控制，因此必须与主机发生接口关系。

1) 空转速度。当主机在空转速度下运行时，舵桨装置的电控单元接受无源常闭触点信号，当主机速度越过空转速度时，该触点断开。根据触点的闭合与断开状态，离合器决定接排还是脱排。

2) 停车/紧急停车。当主机处于“停车”或“紧急停车”时，电控单元接受到一个触点闭合信号，根据这个触点信号，在主机起动或急停时，确保离合器处于脱排状态。

5.2.1.3 离合器控制

主机工作在任何速度下，按下“离合器脱排”按钮，离合器将自动脱排；当主机在空转运行时，按下“离合器接排”按钮，离合器将自动接排，“离合器接排”按钮只有在

主机空转时才具有控制有效性。

5.2.2 舵桨装置电气系统设计

在舵桨装置电气控制系统中有三个关键部件,它们分别是: f/U 变换器、数字比例放大板 DPV 及控制板 DCM。

5.2.2.1 f/U 变换器

(1) 记录桨轴转速,并在一个固定转速位置进行离合器控制的接/脱排。

(2) 将转速传感器输出的频率信号转换成模拟电压输出(用于转速指示,并将输出直流电压至舵比例放大器)。

5.2.2.2 数字比例放大板 DPV

(1) DPV 放大板经由 CAN 总线接口接收 DCM 控制板的一个随舵桨角度变化相对应的信号,信号放大后送至液压阀组,阀特性曲线数据预先存储于 Eprom 记忆芯片中。Eprom 存储区分成 15 个单独的部分,通过编码变换,可以改变 15 条不同的特性曲线的模拟输出量。

(2) DPV 包括 2 个模拟端口,用于转舵和调整液压阀的控制输出(模拟输出)。

(3) 故障诊断功能,故障诊断包括保护设备并伴有发光二极管的亮灯指示。

5.2.2.3 控制板 DCM

(1) 包括 360° 全回转转舵机系统的赋值逻辑单元和参考电源(10V/DC),实现舵机预设角度和实际角度进行比较,通过 CAN 总线接口将一个微分差动角度信号送至放大板 DPV。

(2) 处理控制及监视驱动器的模拟量和数字量值。

(3) 故障诊断功能,故障诊断包括保护设备并伴有发光二极管的亮灯指示。

6 船用电梯电气控制

船用电梯作为垂直输送的升降设备,其特点是通过电气或其他控制方式可以将乘客或货物安全、合理、有效地送到不同的楼层。随着电力电子技术的发展,变频调压调速装置越来越多的用于电梯控制系统,电梯的优质服务已不再是单一“时间最短”问题,而是采用模糊理论、神经网络、专家系统的方法,以期实现电梯与群控管理的最佳模式、合理的配置和使用、远程监控和故障诊断、节能。

6.1 船用电梯的分类及构成

船用电梯按用途分为客梯、货梯、客货梯、医用梯、杂物梯等;按拖动方式可分为交流电梯、直流电梯、液压电梯;按有无司机分类可分为有司机电梯、无司机电梯、有/无司机电梯;按控制方式分类可分为按钮控制电梯、信号控制电梯、集选控制电梯、并联控制电梯、群控电梯;按曳引结构分为有齿曳引电梯、无齿曳引电梯。其构成如图 6.4-20 所示,主要组成部分有:①曳引部分包括曳引机、制动器和曳引钢丝绳及其端接装置;②引导部分包括导轨和导轨支架;③导向轮装置;④对重装置;⑤轿厢装置;⑥门机系统包括自动开门装置和厅门;⑦超摇摆保护装置;⑧电气设备及控制装置由曳引电动机、选层器、传动及控制柜、轿厢操纵盘、呼梯按钮和厅站指示器;⑨安全保护装置包括限速器、安全钳、缓冲器、终端超越保护装置等组成。

6.2 船用电梯电气控制系统的主要技术要求

由于船用电梯运输客货特点,对电气控制系统提出了如下要求:①安全可靠;②舒适性强,起制动平滑,噪声小;③平层准确;④节能省电;⑤质量小,空间体积小;⑥技术

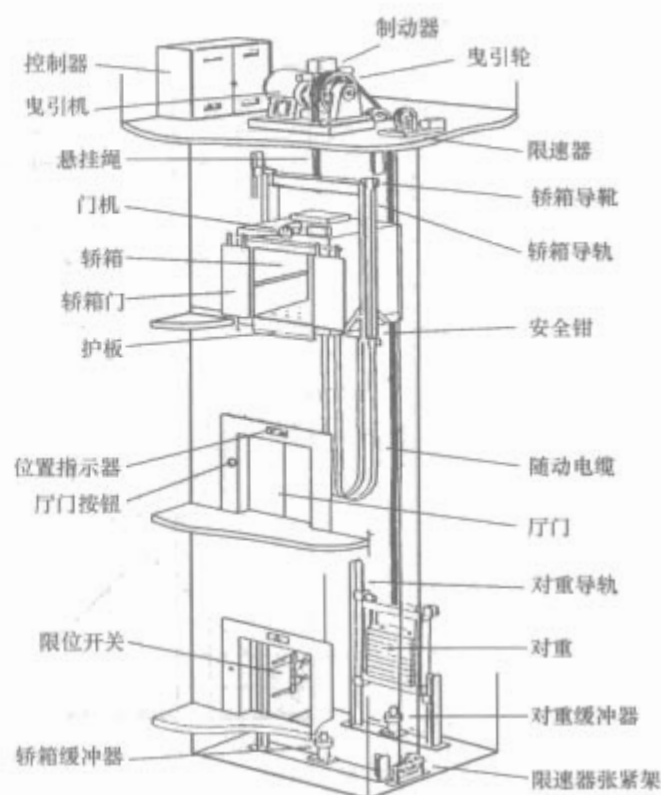


图 6.4-20 船用电梯的基本结构

先进,维修方便;⑦供电条件。因此在设计上必须根据船用电梯标准出发,充分考虑完善的,强制的电气及机械联锁及保护措施,确保人身及设备安全。

6.3 船用电梯的电力拖动

电力拖动系统是船用电梯的动力源,对电梯的起动加速、稳速运行、制动减速等起控制作用。电梯主要有两个运动,轿厢的升降运动和轿门及厅门的开关运动。

轿厢的运动由曳引电动机产生动力,经曳引传动系统进行减速、改变运动形式(将旋转运动转换直线运动)来实现驱动,其功率在几千瓦到几十千瓦,是电梯的主驱动。为防止轿厢停止时由于重力溜车,还必须设置制动器。并且在设计控制系统时,至少应用两个独立的电气装置来切断制动器电流。根据目前已装船的电梯来看,杂物电梯和载货电梯通常采用交流双速异步电动机定子串电阻调速拖动,由于这种电梯对舒适性和平层准确度要求较低。客货电梯和载客电梯通常采用目前比较通用的变压变频(VVVF)交流异步电动机拖动,这种拖动方式具有优异调速的性能和良好的舒适性,备受广大用户的青睐。尤其是永磁同步无齿曳引拖动技术的发展,提高了传动效率,降低了噪声,传动平稳,占地面积小,是船用电梯最理想的拖动方式,但是存在能耗大、造价高、维修不便的缺点。

轿门及厅门的开与关由开门电动机驱动,经开门机构进行减速、改变运动形式来实现,其驱动功率较小(通常在 200W 以下)。轿门及厅门常见的电力拖动方式大致可以划分为:

- 1) 直流电动机电枢串、并联电阻调速拖动方式,目前已很少采用。
- 2) 直流电动机斩波调压调速拖动方式。
- 3) 交流异步电动机 VVVF 调速拖动方式,采用交流电动机,系统结构简单,可靠性进一步提高,运行平稳,效率更高,是当前船用电梯开关门电路中普遍采用的方法。
- 4) 力矩异步电动机拖动方式。
- 5) 伺服电动机拖动方式,这是近几年出现的电梯开关门方式,该方法采用伺服电动机作为驱动电动机,其反应灵

活, 响应迅速, 是一种有发展前途的开关门方式。

6.3.1 交流双速电梯的拖动

交流双速电梯的拖动结构和技术简单, 运行舒适感差, 额定梯速一般在 1m/s 以下, 这种电梯目前通常采用可编程序控制器控制。交流双速电梯的运行曲线见图 6.4-21。交流双速电梯采用变极调速电动机作为曳引电动机, 其变极比通常为 $6/24$ 极, 也有 $4/6/24$ 极和 $4/6/18$ 极的。从电动机结构看, 有采用单绕组改变接线方式实现变极, 也有采用双绕组的, 它们各具有不同的极数, 通过连接不同的绕组来实现不同的转速。

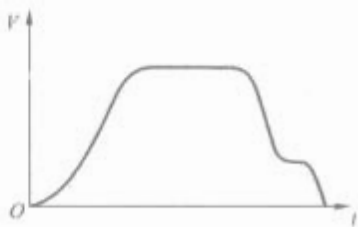


图 6.4-21 交流双速电梯的运行曲线

(1) 双绕组 $6/24$ 极变极电动机用作电梯曳引机的主电路。图 6.4-22 给出了采用双绕组实现 $6/24$ 极电机变极的双速电梯主电路。图中电动机 M 有两套绕组, 快速 (6 极) 绕组的引出端为 $XK1$ 、 $XK2$ 、 $XK3$, 在内部三相接成 Y 形接法; 慢速 (24 极) 绕组的引出端 $XM1$ 、 $XM2$ 、 $XM3$, 在内部也是 Y 形接法。接触器 KS 用于接通快速绕组实现快速启动、运行用。接触器 $KM1$ 则用于接通慢速绕组以实现减速、慢速运行用。

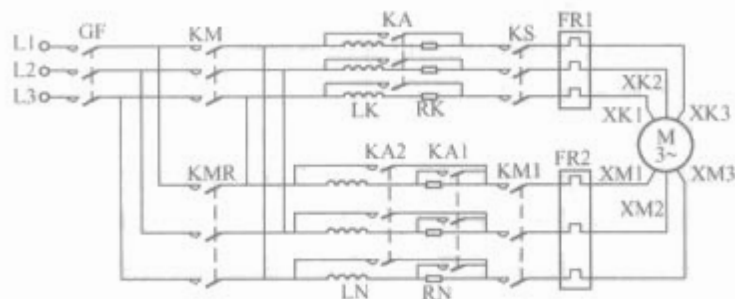


图 6.4-22 采用双绕组变极电动机的双速电梯主电路

(2) 单绕组 $6/24$ 极变极电动机用作电梯曳引机的主电路。图 6.4-23 是采用单绕组变极电动机作为电梯曳引电动机的双速电梯主电路图。与双绕组变极电动机电路相近。图中采用一个快速接触器 $KS1$, 当快速 (6 极) 运行时, 通过 $KS1$ 的常开点将电动机端子 1 、 2 、 3 短接到一起构成另一个星形点, 使电动机接成双星形 (YY) 接法。当 KS 、 $KS1$ 吸合时, 电动机以 6 极 YY 接法快速运转。当 KS 、 $KS1$ 断开, 而 $KM1$ 接通时, 电动机被接成 Y 形成 24 极, 转速降至快速绕组时的 $1/4$, KM 是上升接触器, KMR 是下降接触器。

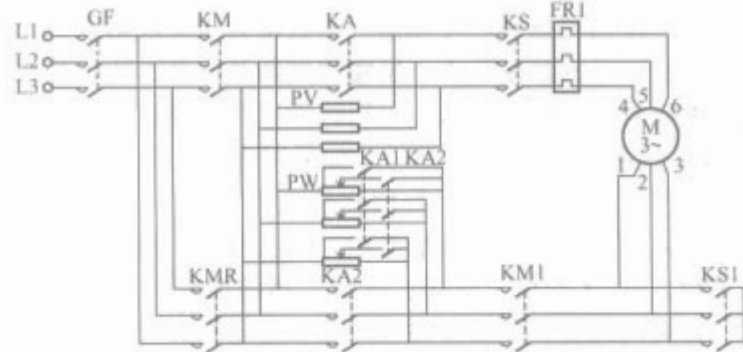


图 6.4-23 采用单绕组变极电动机的双速电梯的主电路

6.3.2 变频调速电梯拖动

根据公式 $n=(1-s)60f_1/p$ 可知, 改变电动机交流电源的频率 f_1 , 就可以实现对异步电动机的调速。由于变频调速

不涉及异步电动机的转子电路, 因此可以采用笼型异步电动机作为生产机械的拖动电动机。笼型异步电动机结构简单, 价格低廉, 坚固耐用的优点使变频调速具有较大的吸引力。电力电子技术的飞速发展, 功率开关元件的新品种不断出现, 正弦波脉宽调制技术 (SPWM) 和矢量控制技术的提出和实现, 以及计算机技术和大规模集成电路的飞速进步, 极大地简化了 SPWM 以及矢量控制技术, 增强和扩展了变频器的功能, 使得交流变频调速技术达到了可以和直流斩波技术相媲美的程度。目前变频调速电梯已经成为船用电梯的主流产品。

6.3.2.1 异步电动机变频调速控制

就变频调速应用于交流异步电动机的调速而言, 从三相异步电动机的机械特性可知, 为了电动机的安全使用, 在基频 (即电动机额定频率) 以上为接近恒功率调速, 在基频以下为恒转矩调速, 而电梯的负载属于恒转矩负载, 故只需在基频以下调速。这种情况下必须与变频相协调地变压, 通常称这种控制为 VVVF (Vary Voltage Vary Frequency 变频变压)。

6.3.2.2 变频调速电梯的主电路

船用变频调速电梯的主电路中, 低压断路器 QF 和接触器 KM 用于接通变频器的电源; 主回路中串入的电抗器 L_{AC} 用于改善功率因数; 输入滤波器 Z_1 滤波器 Z_2 用于抗干扰; 制动电阻 R_B 用于能耗制动。由于变频器本身具有比较完善的过电流和过载保护功能, 且低压断路器也具有过电流保护功能, 故在进线侧不接熔断器。再加上变频器内部具有电子热保护器, 故在只接一台电动机的情况下, 可不必接热继电器。完整的主电路见图 6.4-24。

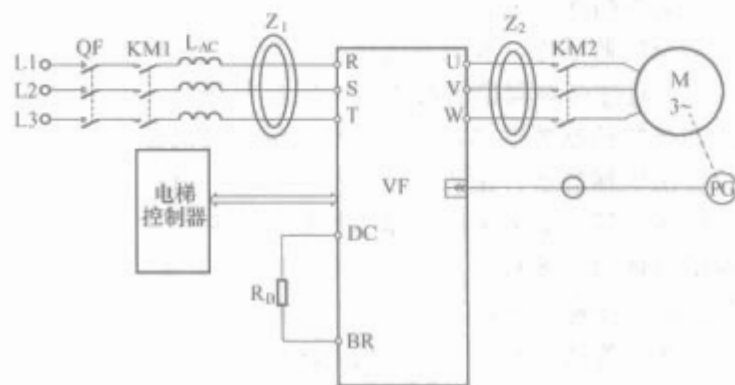


图 6.4-24 交流变频调速电梯主电路

6.4 船用电梯的控制

根据船用电梯的不同用途, 可以有不同的负载, 不同的速度及不同的驱动方式。即使相同用途的电梯, 也可以采用不同的操纵控制方式, 但电梯不论使用何种控制方式, 总是按轿厢内指令、层站召唤信号的要求, 向上 (或向下) 启动加速、减速制动、停止等, 整个过程由电梯的信号控制系统来完成。在我国目前装船使用的电梯中, 大部分载货电梯采用可靠性高、通用性强的可编程序控制器控制系统, 还有少部分载货电梯仍然采用继电器逻辑电路。通常情况下, 客货电梯、乘客电梯、医疗电梯均采用可编程序控制器或微机控制系统, 具有很强的灵活性和适用性。

6.4.1 船用电梯的主要控制部件及电路

6.4.1.1 轿内操纵面板

轿内操纵面板安装在电梯轿厢内靠门的轿壁上, 控制面板上装有根据本电梯设置的运行功能按钮、开关、楼层指示器等。简要介绍如下:

(1) 选层按钮。轿内操纵面板上装有与电梯停站层数相对应的选层按钮, 按钮内装有指示灯。当按下欲去层楼的时候, 该指令被登记, 相应的指示灯点亮, 当电梯到达预选层

楼时,相应的指示被清除,指示灯也就熄灭,未达到的预选层楼按钮内的指示灯仍然亮,直到完成指令后熄灭。

(2) 开关门按钮。一般配置在具有自动门系统的电梯上,其作用是控制电梯的轿门开关动作(厅门由轿门带动,在开关门过程中,轿、厅门联动)。

(3) 警铃按钮。当电梯在运行过程中突然发生故障停车,而电梯司机或乘客又无法从轿厢中出来时,按下该按钮,通知维修人员及时救援被困在轿厢内的司机和乘客。

(4) 楼层指示器。其作用是用来指示电梯目前所在的位置和运行方向。通常楼层指示灯采用数码管显示,楼层指示灯上配置译码电路和驱动电路,显示轿厢位置。上、下行指示灯通常采用上、下行三角指示灯。超载指示灯采用文字显示灯。

(5) 蜂鸣器。当电梯在有司机状态下运行,有人按下厅外召唤按钮,蜂鸣器即发出声音,提醒司机及时应答。

(6) 检修按钮。供电梯维修人员在检修时使用。

(7) 直驶按钮。在有司机状态下,按下这个按钮,电梯只按照轿内指令停层,而不响应外呼信号。当满载时,通过轿厢超载装置,可自动将电梯转入直驶状态,也只响应轿厢内指令。

(8) 风扇开关。控制轿厢内通风设备的开关。

(9) 照明开关。用于控制轿厢内照明设施,其电源不受电梯电源控制,当电梯故障或检修停电时,轿厢内仍有正常照明。

6.4.1.2 层楼信息的获取

(1) 通过光电开关或干簧管感应器获取。由于船用载货电梯大部分采用交流双速拖动方式,其楼层信息的获取主要通过光电开关或干簧管感应器获得。其工作原理是电梯运行时,安装在轿厢上的隔磁板插入某层感应器时,光电开关或干簧管感应器动作,发出开关信号,指示相应的楼层。

(2) 通过可编程控制器或微机控制器获取。可编程序控制器和微机控制的电梯,通过对旋转编码器的脉冲计数,可以计算出电梯的运行距离,结合层楼数据,就可获得电梯所在的位置信号。如果采用可编程控制器控制,旋转编码器的脉冲信号通过分频板卡(采用分频卡通常是降低脉冲频率,使得控制系统能够接收)送入可编程控制器的高速计数器输入端,来计算楼层距离。由于传输距离及其他干扰因素,通常会发生脉冲丢失现象,在系统软件编写时,要考虑脉冲数的补偿程序,来保证平层的准确度。

6.4.1.3 平层装置

为了保证电梯轿厢在各层停靠时准确平层,通常在轿顶设置平层装置。为了提高控制系统的可靠性,通常采用光电开关作为平层装置。其具体的工作原理是:电梯运行时,安装在各层站停层位置的隔磁板(通常长度为200mm)插入轿顶的感应器时,光电开关动作,发出开关信号,输入控制系统,通过系统软件通知电梯停车。

6.4.1.4 检修箱

检修箱是保证电梯正常工作的重要一个部件。通常在电梯机房控制柜、轿厢内与轿顶装有检修按钮箱。检修箱配置一个检修开关、急停按钮以及慢上、慢下按钮。轿顶检修箱还配置相应的电源插座。用以方便电梯轿顶电气设备施工和检修用。在硬件电路设计上,通常按电梯行业标准执行,确保轿顶检修优先的原则。

6.4.1.5 门机控制系统

门机控制系统通常布置在轿顶,门机系统主要的电气元件包括:门电机、门机调速装置、开关门到位行程开关等,这些电气元件要根据规定装在规定的盒内。

6.4.1.6 超摇摆保护装置

超摇摆保护装置是船用电梯安全保护的一部分,在船舶摇

摆角度超过允许值时,电梯就近停靠,疏散轿厢内乘客,返回基站,同时取消内指令、外召唤登记,断开开门电路将门关闭。

6.4.1.7 安全保护电路

电梯的安全保护电路包括两部分:一部分为安全保护继电器回路,另一部分为轿厢门及厅门联锁保护电路。电梯的安全保护继电器回路通常包含:轿厢内急停按钮,轿顶急停按钮,底坑急停按钮,轿厢顶安全窗开关,安全钳开关,限速器断绳开关,限速器超速开关,上、下终端机械开关。有的电梯还把电梯轿厢缓冲器开关、对重缓冲器开关、曳引电动机热保护触点接入安全保护继电器回路。如果采用交流双速电动机拖动,还要把相序保护继电器及快慢车热继电器也接入安全保护继电器回路。轿厢门及厅门联锁保护电路,在设计上必须保证只有轿门和厅门闭,电合上锁后,门锁继电器吸合梯才能运行,否则电梯不能运行。

6.4.1.8 电气控制柜

电梯电路中绝大部分的电器、电子元件集中在电气控制柜中,其主要作用是完成电梯电力拖动系统的控制,从而实现对电梯功能的控制。船用电梯控制柜通常放置在电梯机房内,由于船上的空间有限,在满足功能要求的前提下,尽可能节省空间。

6.4.2 船用电梯的 PLC 控制

由于船舶的工作环境比较恶劣,船舶电梯的层站数相对较少、而系统的安全性要求高。基于此,大部分国产船用电梯目前采用可编程序控制系统。

6.4.2.1 PLC 控制的船用电梯控制原理

电梯控制要从电梯的运行特点出发,以控制系统的输入和输出信号为基础,首先要进行安全电路检查,电梯只有在满足规定的安全条件才可以运行;其次,要在运行过程中不停地搜索呼梯信号,根据内、外呼信号确定电梯运行的方向,并不时进行选层运算,比较电梯轿厢实际位置与内、外呼梯所指定的位置、确定最佳减速点位置、并修正误差等,并做出诸如上行、下行、起动、加速、减速、制动等一系列决定。最后,准确停层、开门、放人、关门,继而再重复前两步的工作。在每一次运行过程中,运行速度曲线呈“S”形。就变压变频调速系统而言,一般采用闭环矢量控制或闭环伺服控制,不管采用何种控制方式,都要合理配置驱动器参数,做到电梯运行平稳、舒适,平层准确。就交流双速系统而言,要设置合理的加、减速时间,尽量减少冲击,确保运行平稳。并合理利用制动辅助接触器,防止电磁制动器严重磨损,延长使用寿命。

6.4.2.2 PLC 的输入接口

呼梯信号的数量根据控制方式确定,如果采用全集选控制则内、外呼梯信号数量为 $3N-2$ 个,其中 N 为层站数。采用轿外按钮控制时,呼梯信号的数量为楼层站数 N 。

层楼信号的数量取决于层楼数判断及计算方法,若采用旋转编码器光电脉冲输入,或用软件计算层楼数的方法,输入PLC仅需1~2个输入信号,如采用光电开关或磁感应开关,则每个层站需占用一个PLC输入点。

输入控制信号通常包括电锁、工况选择、检修上行、检修下行、有/无司机、直驶、超载、超摇摆保护、开关门按钮、开关门限位、平层开关(交流双速电梯通常为了保证平层准确度采用上平层、下平层)、上强迫换速、下强迫换速等,对不同梯型及梯速的电梯,还有一些特殊的输入信号。

6.4.2.3 PLC 的输出接口

可编程序控制器通过软件对输入控制信号进行处理后,由输出接口发出控制信号及各种指示信号。

(1) 指示信号。指示信号包括内选、外召唤指示信号及层楼指示信号。

(2) 输出控制信号。从安全角度和负载电流大小考虑,可编程序控制器系统仍需使用少量接触器和继电器。船用载货电梯通常采用交流双速电动机拖动,由 PLC 控制的接触器通常有上行、下行方向接触器,快车接触器,快车加速接触器,慢车接触器,各级制动减速接触器等组成。采用变频变压调速的客货电梯及客梯主要的控制接触器包括控制电源接触器和主控制接触器组成。如果采用自动门系统,就需要开门、关门继电器。不管什么梯型,制动器继电器和制动器辅助继电器是必须的。

(3) 可编程控制器输出单元的类型。船用电梯主要采用

可编程序控制器的继电器输出类型。由于输出控制信号(电梯信号控制灯、接触器、继电器等)通常接交流 220V 和直流 24V 以下,负载电流不超过 2A,且不是频繁动作的负载。故使用 PLC 的继电器输出类型为宜。

6.5 船用电梯的微机控制

微机控制系统的配置与可编程序控制器控制系统的配置基本相同。不同之处是在微机控制系统中,通常采用串行传输,即电梯的召唤或指令信号及其对应的记忆灯指示信号是通过控制器分时接受和分时发出的,这样可使信号敷线少,便于维修。提高了系统的可靠性。微机控制对层站数较多,需要并联控制或群梯管理控制的电梯较为适用,即可靠又经济。

第5章 电磁弹射装置

1 弹射装置

弹射装置一般特指航空母舰飞机起飞的助推动力装置。在航母的早期时代，由于舰载机重量轻、起飞速度低，舰载机一般都采用自主起飞的方式，随着飞机的重量增大，起飞速度提高，特别是喷气式飞机上舰后，飞机仅凭自身的动力已无法完成舰上起飞，所以滑跃起飞和弹射起飞逐渐被各国航母所采纳。滑跃起飞是一种利用舰载机自身动力从航母舰体前部的滑跃式跳台上实现起飞的起飞方式。这种起飞方式无需特殊设备，对机体结构要求低，但是它也有不足：不能让吨位较大的战机满载起飞，极大地限制了战机性能的发挥；同时滑跃起飞方式不能被固定翼预警机、反潜机等发动机推力较小的机种使用，因而依靠滑跃起飞的航母综合作战能力不强，它主要用在舰载机性能较高、架数较少的轻型或中型航母上。弹射起飞是一种依靠弹射装置将飞机在短距离内加速到起飞速度的起飞方式。历史上出现过的弹射装置主要有三种类型：液压弹射装置、蒸汽弹射装置和内燃弹射装置。二战时的航母使用的都是液压弹射装置，但它的推力有限，弹射能量极小，且存在安全性的问题，现已退出历史的舞台。而内燃弹射装置的技术至今还不够成熟，因此，目前世界上的主流弹射方式仍然是蒸汽弹射，这也是与过去舰载机的种类单一，战争需求相适应的。然而，随着军事科技的迅猛发展和海洋在各国军事地位的提升，未来航母需要的舰载机机型和吨位的范围将进一步扩大，从小型的无人机到大型战斗机、固定翼预警机、一机多弹的歼击机、联合攻击机，都要能从航母上弹射起飞。须知，飞机的起飞是依据弹射曲线来进行的，不同的机型需要不同的起飞速度以及不同的弹射曲线（见图 6.5-1），这就要求弹射装置有宽广的调节范围来满足不同机型的推力和速度要求。而蒸汽弹射器由于是机械驱动的原理，惯性常数大，速度响应慢，速度和推力调节范围小等固有缺陷，对此已无能为力，以美国 C13-1 型蒸汽弹射器为例，其典型的弹射曲线见图 6.5-2。从图中可见，其加加速度时间较长，且在动力冲程阶段，由于系统为开环控制，加速度不恒定，导致峰均加速度比高，这将对舰载机的机体产生较大的影响。因此，未来的战争迫切需要一种新型的弹射装置来克服蒸汽弹射装置的不足，使得多种飞机均可以上舰使用。而电磁弹射装置由于其工作原理与传统的弹射装置有着本质的不同，且能满足上述各项要求，故

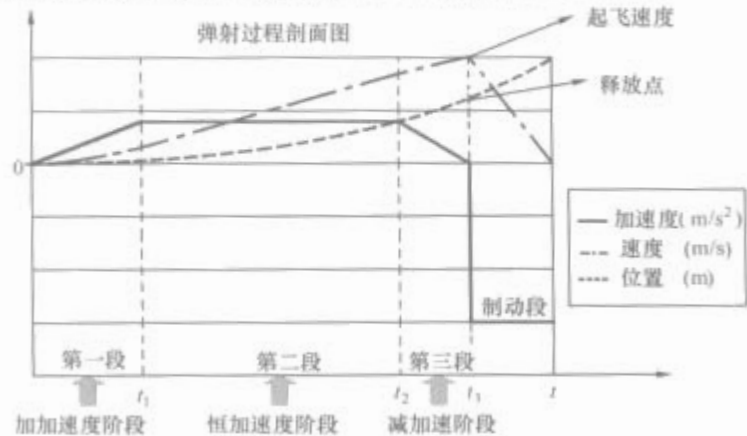


图 6.5-1 舰载机弹射曲线

应运而生。

电磁弹射装置是一种电能向动能转化的弹射装置，它利用长定子直线电机产生的行波磁场推动飞机达到起飞的速度。早在 1945 年，美国西屋电气公司就研制成功电力牵引飞机弹射器，它以 7400kW 的直线电机为动力，在 4.1s 时间内成功地将一架重 4535kg 的喷气式飞机在 165m 的行程内由静止加速到 52.2m/s 的速度。但由于当时其他相关技术的限制，使得这种弹射器没有进入应用阶段。然而，科研人员对此项技术的探索并没有因此而停滞不前，20 世纪 70 年代以来，随着大功率直线电动机技术、高能量密度储能技术、大容量功率变换器技术及计算机网络控制技术的不断突破和飞跃发展，时至今日，电磁弹射作为一种先进的飞机发射技术，又重新成为了世界上研究的热点。

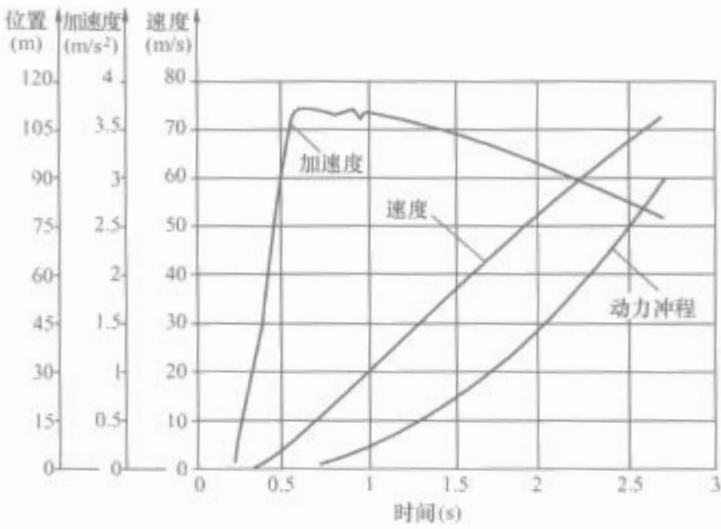


图 6.5-2 美国 C13-1 型蒸汽弹射器的典型弹射曲线

电磁弹射装置的原理同一般的旋转电动机基本相同，不同之处是以直线电动机定子替代了传统的旋转电动机的转子，而呈直线运动方式。电磁弹射器工作时，由动力调节系统向弹射电动机提供一组电磁脉冲，产生磁力推动弹射系统中的一个被称之为“往复车”的部件，向前移动并加速至 28~102.89m/s，可使飞机以 55~200 节的速度在弹射器的长度范围内（大约 100m）起飞，并且无需迎风起飞。

同当前使用的蒸汽弹射器相比较，电磁弹射装置具有蒸汽弹射装置无可比拟的优点，具体对比分析见表 6.5-1。目前美国已决定在其新型航母上采用电磁弹射装置，预计未来将在英国、法国等更多国家的航母、两栖舰上得到更大范围的应用。

表 6.5-1 蒸汽弹射装置和电磁弹射装置对比分析			
比较项目	蒸汽弹射器	电磁弹射器	原因分析
能够弹射的飞机种类	少	多	直线电动机的驱动系统在弹射期间功率可连续大范围调节，可弹射几十公斤到数十吨重的飞机，包括无人机。而蒸汽弹射器不具备功率连续调节的功能

续表			
比较项目	蒸汽弹射器	电磁弹射器	原因分析
能否与滑跃跑道相配合	不能	能	直线电机的定子采用分段连接方式,因此可灵活地与滑跃跑道弯曲部分连接,形成连续的跑道。而蒸汽弹射器由于跑道只能为直线,无法弯曲,故不能实现与滑跃配合
加加速度时间	0.6~0.8s	0.1~0.3s	电磁弹射装置驱动系统响应快,控制精确,可以在较短时间内达到较大加速度。而蒸汽弹射器存在热动力过程,惯性常数大,加加速度时间相对较长
体积	1133m ³	350m ³	电磁弹射装置构成简单,且系统采用集成化、模块化、全电化设计,因而体积较小,有利于舱室布置。而蒸汽弹射装置包括汽缸、储气罐、锅炉、海水淡化设备、贮水池等设备,故体积庞大
效率	4%~6%	50%	电磁弹射装置为电能向动能转化,损耗极少。而蒸汽弹射器是热能向动能转化,热效率极低,大部分过热蒸汽在弹射结束时作为废气排放掉
系统控制	开环	闭环	电磁弹射装置的闭环控制系统可以实时的控制各子系统的运行,使加速度恒定。而蒸汽弹射器没有闭环控制系统,因而不能进行精细控制,在低速范围使用受到限制
可维护性	较差	较好	电磁弹射装置部件较少,且关键部件均采用了冗余设计。直线电机定子采用分段方式,某段出故障时容易更换。而蒸汽弹射装置由于体积庞大,部件较多,汽缸、储气罐、滑轮组、阀门等可维护性较差,影响作战效能

表 6.5-2 是对美国海军提出的电磁弹射装置性能要求,它是根据航空母舰以及飞机的空气动力机翼操作要求来确定的。目前电磁弹射装置设计工作主要放在由脉冲盘式振荡器通过循环换流器供电的直线电动机的设计方面。从主平台独立电源获得的平均功率以动能的形式贮存在盘式振荡器的转子中,这部分能量在弹射过程的 2~3s 脉冲时间内被释放出来,高频功率被输送到作为弹射电动机高频高压电源的循环换流器,直线电动机从循环换流器获得动力并沿着弹射行程将飞机加速,在这过程中始终提供“实时”闭环控制。

表 6.5-2 美海军电磁弹射装置的性能要求

起飞速度 (m/s)	28~103
最大拖力与平均拖力之比	1.05
弹射能 (MJ)	122
起飞周期 (s)	45
重量 (kg)	<225 000
体积 (m ³)	<425
起飞速度偏差范围 (m/s)	-0~+1.5

电磁弹射技术是一种新兴的直线推进技术,适宜于短行程发射大载荷,在军事、民用及航空航天领域都具有广泛的应用前景。

(1) 大功率直线电动机技术。海军利用该项技术不仅可以在航母上弹射飞机,还可以用来发射鱼雷、导弹,或做成防空用的电磁轨道炮;陆军可以利用该项技术做成电磁增程器,用来发射导弹或做成穿甲武器;空军可以将该项技术用于地勤的防空上;在航天领域,该项技术也可以用来发射卫星,实现地对空的定向发射。在民用的高速列车、矿井提升机、直线电梯、大型冲压机等诸多领域,该项技术也有广阔的应用前景。

(2) 大容量飞轮储能技术。作为一项新兴的高科技储能技术,飞轮储能装置拥有传统化学电池无可比拟的优势已经被人们所认同,它的理论论证已经比较成熟,而且它的技术特点非常符合未来储能技术的发展方向。在军事上它可应用于航母、高能武器、航天航空设备、军用战斗车辆、大型水面舰艇、新型潜艇等舰船、特别是新一代舰船综合电力系统,以提供大功率脉冲放电、提高电力系统稳定性和电力系统在故障状态下连续可靠供电的能力。在民用领域,它可以做成“绿色”的飞轮电池,运用到大型混能牵引机车、家用轿车、UPS 等设备上。

(3) 模块化超大功率变换器技术。数十甚至数百兆瓦的变换器技术是强弱电混合、机电一体化的综合性技术,已经渗透到电气传动领域的所有技术部门中。在军事上该技术可应用于航母、大型水面舰艇、新型潜艇等舰船、特别是新一代舰船综合电力系统中的区域配电、电力推进的变频调速装置上,还可应用于雷达发射器、高能脉冲武器、分布式独立电源供电系统等。在民用方面可运用到电力拖动、交流输电系统、应用电源系统、电力电子变压器、变速发电机组等。

2 系统组成[7]~[15]

电磁弹射装置主要包括四个部件:能量存储系统、动力调节系统、直线电动机和闭环控制系统,它们之间的连接关系见图 6.5-3。

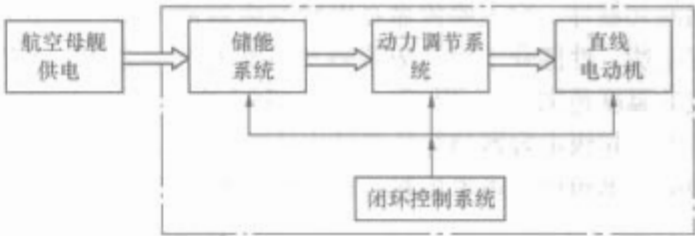


图 6.5-3 电磁弹射装置结构框图

2.1 储能系统

电磁弹射装置在工作时,瞬时功率极大,往往远大于舰船电力系统总容量,所以为了不影响电力系统正常供电,需要一种大容量储能装置,能够实现在 40s 左右以较小功率从供电系统获得能量,弹射期间向直线电机短时(2s 左右)大功率放出能量的缓冲功能。针对弹射装置需要大功率容量、超高峰值、脉冲放电的特点,储能系统必须具有高功率密度、高能量密度、高可靠性、长寿命等特性。根据典型飞机负载所需的弹射能量,储能装置的主要技术指标初定为:储能装置在 2s 内提供给直线电动机的能量为 122MJ;并可以在 40s 内再次充电到额定值;储能系统工作周期为 45s。图 6.5-4 是储能装置的弹射工作循环。储能装置只能在空闲 1 和空闲 2 的时间内充电。主电力接口在弹射时断开,以避

免配电系统出现电磁干扰。

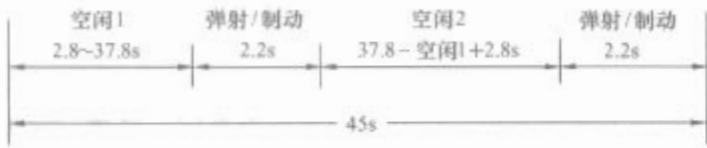


图 6.5-4 储能装置工作循环图

储能系统可选方案有电场储能（超级电容器）、磁场储能（超导储能系统）、电池储能（镍氢电池、锂电池、铅酸电池等）和机械储能（中速飞轮、高速飞轮）等。表 6.5-3 列出了各种能量储存系统的性能初步比较。在电磁弹射装置的实际应用中，对大部分储能系统，其功率密度将比表中所列数据有所下降。因为表中数据一般是根据常规不间断供电电源的工作条件确定的，它要求系统在一次放电后，接着再有一个较长的停歇和充电期。而电磁弹射装置的工作循环是反复进行的，对表中所列储能系统都有限制发热的问题，因而部分技术指标将会有所下降。

表 6.5-3 各种能量储存系统的性能初步比较

储能装置 类型	功率密度 (W/L)	比功率 (W/kg)	弹射寿命 (弹射次数)	风险性
超级电容器	4800	4300	100 000	中
超导储能装置	700	300	—	高
铅酸电池	700	442	30 000	低
锂离子电池	1800	1800	700 000	中低
镍氢电池①	900	610	500 000	低
高速飞轮	500	500	—	高
中速飞轮	352	350	磁性轴承寿命 10 年 普通机械轴承 5 年	低

① 表中电池的放电深度按照 0.3% 计算。

筛选储能装置是依据目前储能装置的主要技术指标，如：功率密度、比功率、备用功率、弹射寿命、价格、可靠性等指标来综合考虑的。

2.1.1 电场储能装置

超级电容器(超大容量电容器、双电层电容器)，是一种具有功率密度高、充电时间短、使用寿命长等优异特性的新型储能元器件。它主要依靠在电极与电解液界面形成电双层储存电能，性能介于普通电容器和可充电电池之间，可以在较宽的温度范围内(−40℃~60℃)和大电流(10~1000A)下充放电。超级电容器储能装置结构见图 6.5-5，该装置主要由超级电容器组件、逻辑控制、充电模块等三部分组成。

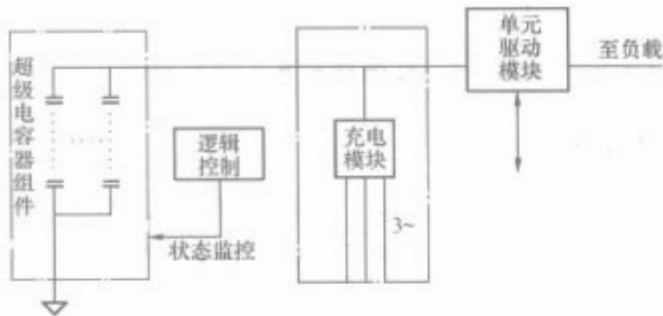


图 6.5-5 超级电容储能装置框图

超级电容器可释放的储能 E 的计算见式 (6.5-1)

$$E = \frac{1}{2} C (U_{cm}^2 - U_{cn}^2) \tag{6.5-1}$$

式中： U_{cm} 为电容器放电前的充电电压； U_{cn} 为电容器放电后电压。

这种装置对充电要求很高，为了防止过充，需要充电平衡系统。在实际应用中，系统的体积重量较大，且高速的 PWM 逆变器对电解电容会带来高频脉动，系统的寿命也有

限，因此目前不适合作为电磁弹射装置的储能系统。

2.1.2 磁场储能装置

超导储能系统使用螺线管形线圈或环形线圈的低温或高温体来储存感应能量。线圈通过直流电，将感应能量储存在磁场中；该低温或高温体使用极高的电流和磁通密度，因而产生高的比功率。

超导储能装置可储存的能量 E 的计算见式 (6.5-2)

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \tag{6.5-2}$$

式中： E 为线圈储存能量； L 为超导体电感； I 为线圈所通直流电流。

在电磁弹射装置实际应用中，要求储能系统高循环、快速深度放电，而超导储能系统目前仍处于发展阶段，一般只用于断续放电场合。超导储能装置的杂散磁场会对弹射器和舰上通信系统产生电磁干扰，且弹射装置在备用期间，储能系统的制冷设备需要很高的备用功率，储能系统自身的体积、重量和价格限制了超导储能系统的在弹射装置中的应用。

2.1.3 电池储能装置

从循环寿命上看，铅酸电池是不能接受的。锂离子电池价格较高，目前没有充分的商品生产作为依托，难以较大生产规模进入市场，但其性能优越，可以考虑作为下一代航空母舰的储能装置。镍氢电池 (NiMH) 的功率密度、比功率、弹射寿命都在设计目标之内，但受放电深度和制造能力的限制。以国产 QNFG-80 型号镍氢动力电池为例，其参数指标见表 6.5-4。

表 6.5-4 国产 QNFG-80 型号镍氢动力电池性能表

额定电压 (V)	1.2
额定容量 (Ah)	80
电池内阻 (mΩ)	<1.3
放电截止电压 (V)	1.0
过热保护温度 (℃)	55
最大连续放电电流 (A)	≥4C (320)
最大连续充电电流 (A)	≥1C (80)
最大短时放电电流 (A)	≥6C (480), 5s
最大外形尺寸 (mm)	115×39×176.5
参考质量 (kg)	≤1.6
质量比功率 (W/kg)	≥250
质量比能量 (Wh/kg)	≥65

图 6.5-6 给出了该型号电池的放电特性曲线。从放电能力来看，镍氢电池最大短时放电能力可以满足要求。但在电磁弹射装置的实际应用中，为了提高储能系统寿命，要求电池储能系统采用“浅充浅放”形式，这样整个镍氢电池储能系统的质量/体积将达到 $867.6 \times 10^3 \text{ kg} / 519.8 \text{ m}^3$ ，超出了设

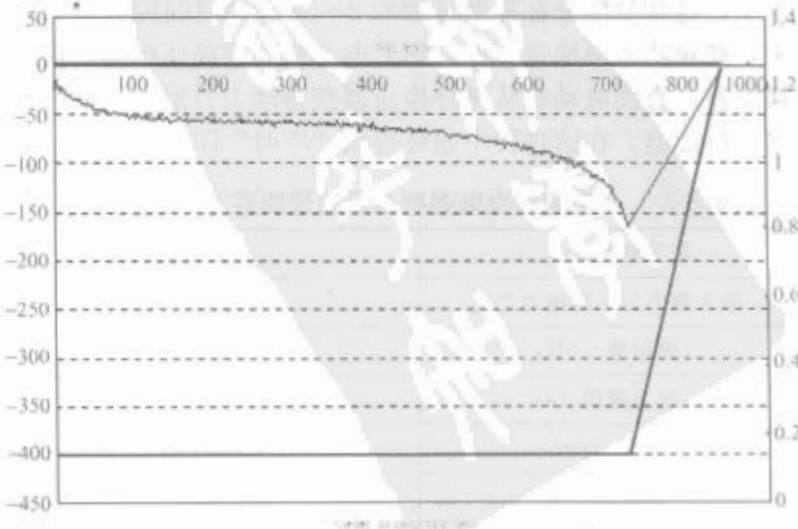


图 6.5-6 80Ah 镍氢电池大电流放电特性曲线

计限制值。

2.1.4 机械储能装置

飞轮交流发电机储能装置的能量是以动能的形式储存,能量储存在旋转的飞轮中。飞轮储能装置主要包括3个核心部分:飞轮、电动机和电力电子装置。它最基本的工作原理就是,将外界输入的电能通过电动机转化为飞轮转动的动能储存起来,当外界需要电能的时候,又通过发电机将飞轮的动能转化为电能,输出到外部负载,它的工作原理图见图6.5-7。

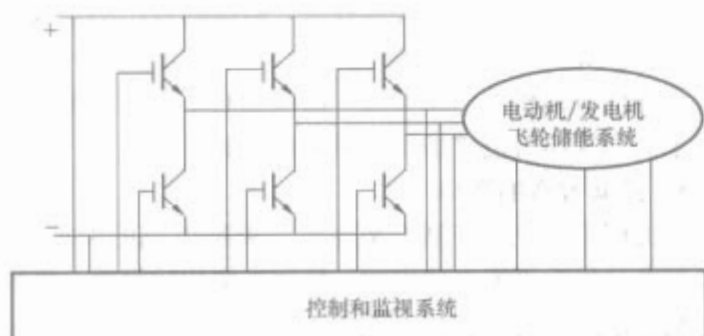


图 6.5-7 飞轮储能装置

飞轮的能量储存量 E 可以用式 (6.5-3) 表示

$$E = 0.5 J \omega^2 = 0.5 J (n \times \pi / 30)^2 \approx 5.48 \times 10^{-3} \times J n^2 \quad (6.5-3)$$

式中: J 为飞轮的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 为飞轮机械角速度, rad/s ; n 为飞轮机械转速 r/min 。

飞轮储能装置在放电的时候,是机械能和电能的相互转化,因此,其放电深度范围非常宽,特别适用于放电深度不规则的场合。在飞轮储能装置中,决定输入输出能量的是与之匹配的电力电子装置,而与外部的负载没有关系,因此可以方便地通过控制飞轮的旋转速度来控制飞轮的充放电,非常适合作为脉冲型负载的储能装置。

依据飞轮最高的机械转速,飞轮储能系统可分为高速飞轮储能系统(转速 $> 15\,000\text{r/min}$)和中速飞轮储能系统($5000 \sim 15\,000\text{r/min}$)。高速飞轮一般需要磁性轴承和高度真空的运行环境。飞轮高速旋转时会增加飞轮的应力,为了防止飞轮飞出等灾难性的后果,必须安装很笨重的外壳,这样将导致储能系统比功率会下降。考虑弹射装置所需技术的可靠性、安全性和成熟性,目前高速飞轮储能系统还无法应用于这种装置上。

中速飞轮对飞轮材料和装置外壳的要求有所降低,安全性能得到极大提高。通过对飞轮、电动机、发电机一体化设计,中速飞轮储能装置的功率密度、比功率和使用寿命得到进一步提高。目前美国已决定在电磁弹射装置上采用中速飞轮作为该装置的储能系统。

2.2 动力调节系统

动力调节系统是联系储能系统和直线电动机之间的桥梁,它将电压(电流)转换为期望的波形,并提供给弹射电机。动力调节系统包括储能系统输出端的整流器、逆变器、逆变器控制模块、弹射电动机分段开关模块、动子位置传感器、连接弹射电动机与逆变器的电缆。图6.5-8给出了动力调节系统的组成。

动力调节系统是依据弹射电动机的供电要求来进行设计的,设计过程中要立足于现有的科技水平,并采用成熟、可靠的技术。动力调节系统的实现主要是从电力电子器件、电力变换电路及控制方案三方面进行综合考虑。

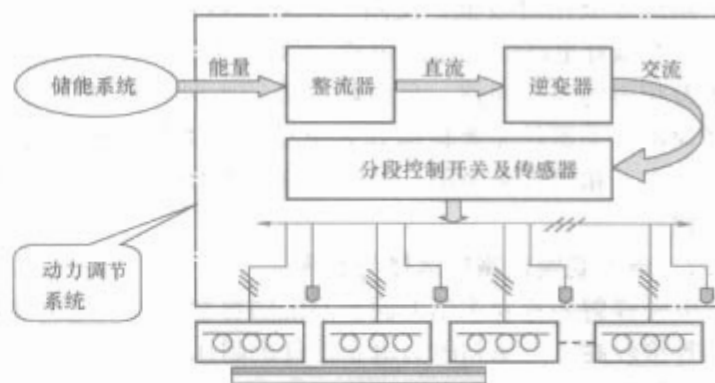


图 6.5-8 动力调节系统组成框图

2.2.1 电力电子器件的选择

电力电子器件是动力调节系统进行电能变换和控制的基础,根据开关器件开通、关断可控性的不同,可分为半控型与全控型。半控型器件如晶闸管(SCR)是当前具有最高耐压容量与最高电流容量的器件,但是它不能用门极控制关断,需要复杂的辅助换流关断电路,开关频率低,使用受到限制。全控型器件有GTR、GTO、MOSFET、IGBT、IGCT等,其中GTR驱动电流较大、耐浪涌电流能力差、易受二次击穿而损坏;GTO在当前各种自关断器件中工作频率最低一般不大于500Hz,在关断时需要很大的反向驱动电流,通态压降大、 dU/dt 及 di/dt 耐量低,需要庞大的吸收电路;MOSFET电流容量小、耐压低、通态压降大,不适宜运用于大功率装置,因此不适合作为动力调节系统的核心器件。下面着重对IGCT和IGBT进行比较。

IGCT是一种在大功率开关器件GTO基础上改进而成的新型大功率电力电子器件,它不需要吸收电路,可以像晶闸管一样导通,像IGBT一样关断,它不仅有与GTO相同的高阻断能力和低通态压降,而且有与IGBT相同的开关性能,是GTO和IGBT相互取长补短的结果,是一种较理想的兆瓦级、中压开关器件,非常适合用于6kV和10kV的中压开关电路。由于设计理想,使得IGCT的开通损耗可以忽略不计,再加上它的低导通损耗,使得它可以在以往大功率半导体器件所无法满足的高频率下运行。IGCT芯片在不串不并的情况下,二电平逆变器容量到达0.5~3MVA,三电平逆变器容量达到1~6MVA。若反向二极管分离,不与IGCT集成在一起,二电平逆变器容量可扩至4.5MVA,三电平扩至9MVA,现在已有这类器件构成的变频器系列产品。目前,IGCT已经商品化,瑞士ABB公司制造的IGCT产品的最高性能参数为4.5kV/4kA,最高研制水平为6kV/4kA。日本三菱公司也开发出了直径为88mm,性能参数为6kV/4kA的IGCT晶闸管。

IGBT可视为双极型大功率晶体管与功率场效应晶体管的复合,它集GTR通态压降小、载流密度大、耐压高和功率MOSFET驱动功率小、开关速度快、输入阻抗高、热稳定性好的优点于一身,因此备受人们青睐。它的研制成功为提高电力电子装置的性能,特别是为逆变器的小型化、高效化、低噪化提供了有利条件,目前IGBT已达到了6.5kV/600A,4.5kV/2kA,1.7kV/2.4kA的技术等级。相对于IGCT,IGBT开关频率更高,在兆瓦级可以工作在3kHz以上。IGBT缺点是导通损耗高,硅片利用率低,这意味着价格的差距;有的模块采用多芯片并联,存在铝线连接的可靠性问题。

通过对比分析可知,IGCT与IGBT作为开关器件均能较好的满足系统要求,同时都存在各自的优点和局限性。IGBT技术上很成熟,供货渠道更为广泛,但由于它的耐

压、耐流等级相对较低,支路上并联的数目比IGCT要多;而IGCT具有更高的耐压、耐流等级,但需要 di/dt 抑制电抗器及相应的吸收回路,且电路电流较大时开关频率较低。选择何种开关器件需要根据弹射电动机的类型、输入功率、工作频率、相数等来确定,以达到整个动力调节系统的性能最优化。

2.2.2 电力变换电路的选择与实现

电磁弹射装置要求动力调节系统的容量较大,电压和电流的等级较高,考虑到电力电子器件的耐压等级和所能承受电流的限制,必须对主电路结构进行合理的设计与布置。

目前,高压变频器还没有像低压变频器那样具有近乎统一的拓扑结构。根据高压组成方式,可分为直接高压型和高—低—高型,根据有无中间直流环节,可以分为交—交变频器和交—直—交变频器。高—低—高型变频器采用变压器实行降压输入、升压输出的方式,存在中间低压环节电流大、效率低、可靠性下降、占地面积大等缺点,只适用于一些小容量高压电动机的简单调速;常规的交—交变频器由于受到输出最高频率的限制,也只用在一些低速、大容量的特殊场合;在交—直—交变频器中,根据中间直流滤波环节的不同,又可分为电压型和电流型,由于电流型变频器的中间环节需要大电感滤波,而电感的重量、体积都很大,因而,电压型交—直—交变频器更适合应用于电磁弹射装置中。

首先从电压方面来考虑,当工作电压很大,单只器件不能满足要求时,常采用的方案有器件直接串联方案,多重化方案与多电平方案(包括二极管钳位型,电容钳位型与多单元H桥级联型)。器件的直接串联需考虑静、动态均压问题,影响均压的因素很多,这些因素共同影响了串联器件开通及关断时间的一致性,使得直接串联方案复杂化,因此在实际应用中较少使用;多重化方案是在多个逆变器的输出端通过变压器实行电压相加,以扩大电压等级,由于变压器的使用使得变流器的重量和体积都增大,所以这里也不予考虑。

多电平方案的基本思想是通过多电平的主电路拓扑结构来获得多级的阶梯波形,可分为二极管钳位型(Diode Clamped)、电容钳位型(Capacitor Clamped)与多单元H桥级联型。由于电容钳位型的直流滤波电容体积大、成本高、使用寿命较短,这里不予考虑。二极管钳位型多电平方案采用多个二极管对相应的全控器件进行钳位,M电平电路每相桥臂需全控型器件 $2(M-1)$ 个,相应钳位二极管为 $2(M-2)$ 个。其一个输出周期内的相电压为M电平,输出波形好,避免了器件串联的动态均压问题,同时可有效的抑制输出谐波,在相同的器件耐压下,可输出更大的电压等级,且所需独立电压源的数量比多单元级联方案少得多。其缺点是所需钳位二极管与开关管的数目较多,且必须考虑多个电源间的均压问题。

多单元H桥级联方案每相由N个H桥单元级联而成,逆变电路输出相电压电平数 $M=2N+1$ 。由于各功率单元结构相同,易于模块化设计和封装,当某一单元出现故障,可将其旁路,其余单元可继续运行,提高了系统的可靠性。直流侧采用独立电源供电,不需要钳位器件,不存在电压均衡问题,输出波形好。其缺点是所需的独立电源数较多,增大了装置的体积重量,对于多相(如6相)电动机,假设每一单元由两个H桥串联而成,则一共需要 $2 \times 6 = 12$ 个三相整流电路供电,若单台同步发电机供电,其相数达到 $12 \times 3 = 36$ 相,这些都是多单元H桥级联方案不利之处。

由以上分析可见,多单元H桥级联与多电平逆变器方

案均能满足动力调节系统要求,与电力电子器件的选择类似,电力变换电路的选择也需要与弹射电动机类型结合,以达到整个动力调节系统的性能最优化。

从电流方面考虑,当工作电流大于单只器件所允许的最大电流,使得单只器件不能满足要求时,常采用器件并联或电力电子装置并联的方案。多个逆变器的并联使得单个逆变器利用率降低,整个动力调节系统的重量,体积都增大很多,同时还需考虑逆变器之间的环流抑制问题,控制也比较复杂,因此这里不予考虑;器件并联需考虑并联器件间的均流,这是需要突破的一个关键技术,但国内外已不乏成功运用的经验。此外,考虑将弹射电动机设计为多相(六相),也可以降低电动机的电流等级,以降低对动力调节系统的电流要求,但这同时也增加了弹射电动机的复杂性。

2.2.3 控制方案的选择

动力调节系统的控制方案需要与弹射电机的类型结合。当弹射电动机为直流电动机时,控制方案比较简单,可采用的控制方案为双闭环直流调速方案,包括速度环和电流环,控制器可采用PID控制器,这里不作为重点讨论。当弹射电动机为交流电机时,变频调速是一种理想的交流调速方法,它不但可以实现无级调速,而且可以通过适当调节电压和频率之间的关系,使电动机始终运行在高效区,以保证良好的动态性能。常用的变频调速控制方案有转速开环恒频压比控制、转速闭环转差频率控制、矢量控制和直接转矩控制等。

转速开环恒频压比控制,也称为恒 v/f 控制。这种调速方法采用转速开环恒频压比带低频电压补偿的控制方法,同时协调控制感应电动势 E 和定子频率 f ,以达到控制气隙磁通不变的目的。在 f 较高时,可以忽略电子阻抗压降,定子相电压 v 近似等于感应电动势 E ,这时保持 v/f 恒定就保证了气隙磁通近似不变。这种控制是从电动机的稳态方程出发研究其控制特性,控制系统结构简单,动态控制效果不理想,只适用于风机,水泵等对调速系统动态性能要求不高的场合。但在弹射装置的试验阶段,这种控制方法可方便地对电动机的性能进行简单的测试,具有一定的应用价值。

转速闭环转差频率控制是通过控制转差以达到间接控制转矩的目的,但是这种方法是基于稳态模型的,它只适用于转速变化缓慢的场合,而实际的弹射装置中,电机始终运行在暂态,因而该方法不能满足电机转速作出快速动态响应的要求。

矢量控制通过矢量变换方法将定子电流分解为励磁分量和与此垂直的推力分量,参照直流调速系统的控制方法,分别独立地对两个电流分量进行控制,从而实现定子电流的解耦。保持励磁分量恒定就可以保持主磁通不变,再根据所需推力的大小计算得到推力分量,从而控制PWM逆变器产生相应的开关动作,得到所需定子电压量,以驱动弹射电动机达到预期的末速度。矢量控制使传动系统的动态特性得到了显著的改善,能较好的满足弹射电动机的要求。

直接转矩控制是基于动态模型的,在控制闭环中的内环,直接控制电动机的瞬时电磁转矩及其变化,并采用砰—砰控制,可以得到电动机的快速动态响应。该方法控制较为简单,省掉了矢量旋转变换等复杂的变换与计算,控制上对除定子电阻外的所有电动机参数变化鲁棒性良好,所引入的定子磁链观测器能很容易估算出同步速度信息,因而能方便地实现无速度传感器化。在电磁弹射装置的实际应用中,该控制方法也是一种具有高静、动态性能的交流调速方法。

2.3 直线电动机

电磁弹射装置的核心是直线电动机，它是将电能转化为动能的执行机构。根据弹射器间歇运行的特点，直线电动机必须具有大功率、高可靠性、抗冲击能力强、高灵敏度等特性。目前，国内外研究用于电磁弹射装置的直线电动机主要类型见表 6.5-5。

表 6.5-5 电磁弹射装置主要可选电动机类型及特性表

弹射电动机类型	定子类型	动子类型	主要特点
直线有刷直流电动机	直流绕组	单匝或连续直流绕组	有烧蚀和电刷损耗
直线同步电动机	多相对称绕组	永磁结构	同步技术控制复杂，且位置传感器要求高
直线无刷直流电动机	多相对称绕组	永磁结构	需要位置检测
直线感应电动机	多相对称绕组	无源结构（磁性次级或复合次级）	结构简单，控制简单，但效率较低

弹射用直线电动机不必采用磁悬浮技术，这是因为：①现代高速轮轨列车最大速度可达 400km/h（111m/s），已经足够满足飞机起飞的速度要求；②磁悬浮的控制包括驱动、侧向、法向悬浮控制等，控制线路复杂，这样将极大地增加电磁弹射装置在短时间、短距离内控制的复杂性和风险性。因而对于表 6.5-5 所列电动机类型，均为常规的滚轮电动机。为了克服电动机单边法向推力，增大电动机推力/体积比，弹射用电动机均采用平面双边型。为了减轻动子重量，减小制动能量，气隙磁通一般采用横向磁通。为了保证弹射的可靠性，弹射电动机的机械气隙较普通直线电动机大得多，一般在 6.5mm 以上。弹射电动机功率极大，电动机均采用短动子、长定子结构形式，定子采用分段供电的方式，被动子覆盖的定子区域各段串联工作，而其他分段则停止工作。

2.3.1 直线有刷直流电动机

直线有刷直流电动机和直线交流电动机相比，明显的优点是：运行效率高，没有功率因素低的问题；控制比较方便、灵活。速度和加速度调速范围广，调速平滑性好。但电动机由于存在电刷，因此存在致命的磨损和“烧蚀”现象。电刷产生的炭粉会导致绕组绝缘能力降低，使弹射装置的可靠性变差。电动机均安装在甲板下方，定子长达 100 多米，电刷的维护相当困难，因而对于大功率、大载荷、长定子弹射装置，直线直流有刷电动机不具可行性。

2.3.2 永磁直线无刷电动机

永磁直线无刷电动机包括正弦波永磁直线无刷电动机（又称永磁直线同步电动机）和方波永磁直线无刷电动机。两种电动机的定子结构形式完全相同，只需在永磁体布置、供电方式、位置反馈、电动机控制上做一定变化即可。相对于方波无刷电动机，正弦波无刷电动机的控制比较复杂，单位面积出力较小，且需要精密的传感器（如光栅尺）以取得动子的位置信号，因此方波永磁直线无刷电动机在弹射装置上更具有适用性。

永磁直线无刷电动机兼有直流电动机和无刷电动机的特点。该电动机的动子一般采用高剩磁，高矫顽力的稀土永磁

材料，如 NeFeB，以提供恒定的励磁磁场。动子可以作为凸极，也可做成隐极。动子与定子间采用轴承接触，利用位置传感器的输出信号来控制电力电子开关的开通或关断，将直流电压变成可控的方波电压供给电机的定子线圈，这样，省去了换向用的电刷，因而有效地解决了有刷电动机致命的“烧蚀”问题。

永磁直线无刷电动机的优点是：单位面积出力大，剪切力可达 200~230kN/m²、起动推力大；由于气隙磁场由永磁体提供，气隙磁密大，且无励磁损耗；具有较硬的机械特性，对负载变化引起的推力扰动具有较强的承受能力，调速范围广；力能指标高，结构简单，体积小，重量轻。但永磁直线无刷电动机也存在一些缺点，如工作频率大，且气隙磁密无法调节，永磁体在高温、大电流、冲击和震动等三种情况下存在去磁风险。美国威斯康星州麦迪逊大学和南卡罗莱纳州大学等一些单位正在研究，将该类型电机应用到电磁弹射装置上。

2.3.3 直线感应电动机

直线感应电动机的结构及基本原理较为简单。直线感应电动机的动子主要有两大类：①单一的铁磁材料，或双边横向磁通的导电材料；②复合材料：如铝铁复合、铜铁复合等。次级可以是带铁轭的铝（铜）次级，或整块铝（铁、铜）板。当正弦电流通过电动机的定子线圈时，会产生向前方向的同步行波磁场。通过与动子的感应作用产生牵引力，推动动子前进；若改变磁场的方向，即改变定子相序，可使动子后退。

直线感应电动机的优点是：动子结构简单，安装方便；动子质量较小，易于起动和制动；电动机控制容易；极距较大，所需供电频率较低；技术成熟，风险较小。由于电动机的气隙较大，直线感应电动机的定子绕组所需电流较大；剪切力较小，一般为 100~150kN/m²；功率因素较小，力能指标较低，电动机所需容量较大；电动机的整体体积较大，重量较重。由于航空母舰舱室空间有限，为了降低电动机的端部高度，电动机还可采用克兰姆（Gramme）环形绕组。

在弹射装置长度一定的情况下，弹射用直线电机所需的额定功率和电磁推力是由飞机的质量和起飞速度决定的。设飞机起飞末速度为 v_f ，负载总质量（包括动子）为 M ，弹射冲程为 l_f ，制动距离为 l_{end} ，起动时加加速度为 j_1 ，直线电机效率为 η ，则有：

弹射过程中平均加速度见式（6.5-4）

$$a_{avg} = \frac{v_f^2}{2l_f} \tag{6.5-4}$$

动力冲程中电磁推力见式（6.5-5）

$$F = Ma_{avg} \tag{6.5-5}$$

加加速度时间见式（6.5-6）

$$t_1 = \frac{a_{avg}}{j_1} \tag{6.5-6}$$

整体弹射所需时间见式（6.5-7）

$$t_3 = \sqrt{\frac{2l_f}{a_{avg}}} \tag{6.5-7}$$

弹射过程中平均速度见式（6.5-8）

$$\bar{v} = \frac{l_f}{t_3} \tag{6.5-8}$$

电动机所需平均功率见式（6.5-9）

$$P_{avg} = F\bar{v} = \frac{Fl_f}{t_3} \tag{6.5-9}$$

电动机所需最大输出功率见式（6.5-10）

$$P_{out} = Fv_f \tag{6.5-10}$$

电动机所需最大输入功率见式 (6.5-11)

P_l = \frac{P_{out}}{\eta} (6.5-11)

电动机所需输出动能见式 (6.5-12)

E = \frac{1}{2} M v_l^2 (6.5-12)

2.4 运控系统

运控系统是电磁弹射装置和操作人员之间的主要对话接口，是电磁弹射器的控制中心，除满足功能外，还具有高可靠性、安全性、电磁兼容性。

运控系统控制飞机弹射的全过程，实现发射过程的精确控制。该系统是一个实时控制、实时管理的系统，可以实现对整个弹射系统的监控，并实现数据资源共享，及时分析、排除运行过程中出现的问题，实现系统的功能检查与故障诊断、系统测试与参数设定、工作状况的自动调节与监控、动静态参数的自动测量与处理、测量结果的管理与检索，信息资源的交互与共享、系统与子系统、子系统与子系统之间的互访等，真正实现测量、控制、监视和技术支持于一体。该系统与舰船数据系统连接，接受弹射公告和气象信息，发送弹射参数，使得弹射控制官可以按弹射步骤自始而终完成弹射。

运控系统一般采用分布式控制技术，主要由电力电子驱动控制模块和弹射控制器两部分组成。弹射控制器是整个弹射装置的中心，负责协调所有系统电子设备。电力电子驱动控制模块负责实时控制功能。

弹射控制器主要功能模块有：

- 1) 弹射电动机运行模式计算系统：针对不同类型的弹射飞机，产生其在不同负载下满足起飞要求的速度、位移曲线，给出安全控制范围。
 - 2) 运行控制系统：自由控制飞机弹射、参数设定，协调储能装置、直线电动机等子系统正常运行。
 - 3) 安全管理系统：对系统运行状态进行监视，当检测到故障状态时，优先动作安全制动控制系统，使整个弹射操作暂停。
 - 4) 运行统计系统：对运行过程进行统计，存储数据。
- 电磁弹射装置在发射过程中是分三阶段的：
- 1) 加速度以规定的加加速度 j_1 从 0 加速到最大弹射值，时间为 t_1。
 - 2) 弹射加速度 a_{max} 不变，所用时间为 t_2。
 - 3) 加速度以规定的减加速度 j_3 减速到 0，并释放飞机负载。

运控系统对于不同的阶段也要采取不同的控制策略，要求弹射控制器具有实时控制速度的功能，以满足不同飞机重量和外部干扰（如风）条件下对末速度和加速度的要求。实现的功能主要有：速度控制；加速度控制；加速度限制；恒定力工作方式张紧控制；峰—均加速度限制；弹射功能实时检测；设备保护用的位置、速度和电流反馈/极限控制；减少误差用的正向环路积分器，具体见表 6.5-6。

表 6.5-6 电磁弹射装置运控系统的控制方法

说 明	控制系统的控制策略
弹射性能包络	采用限制加速度的闭环速度控制
系统状态监视	弹射功能实时监视（电流、温度、位置和速度）
飞机挂接	采用限制力的闭环速度控制
张紧	力闭环控制
加速度分布	峰—均加速度限制；抖动限制
弹射杆挂接	采用带加速度分布控制的闭环速度控制系统
末速度控制	采用限制加速度的闭环控制

续表

说 明	控制系统的控制策略
末速度变化	采用限制加速度的闭环控制
负荷变化	采用带谐振频率滤波的闭环速度控制
断相	每相过电流保护
一次负载率控制	采用带可调加速度限制的闭环控制
减速度	采用限制加速度的闭环控制
往复车制动抖动	采用加速度限制和抖动（加速度导数）限制的闭环速度控制
回复速度	采用带位置反馈和限制的闭环速度控制

控制系统要求能使弹射电动机实现四个不同的功能：弹射、制动、回收、机动。每一个功能只需调节轨线发生装置和位置跟踪装置就可实现。

位置曲线可以根据三段通过时间 t_1, t_2, t_3，加加速度 j_1，减加速度 j_3 来计算得到。即图 6.5-1 中所示的位置曲线，三段中加速度表达式见式 (6.5-13)

\begin{cases} a_1 = j_1 t & 0 < t \leq t_1 \\ a_2 = j_1 t_1 & t_1 < t \leq t_2 \\ a_3 = j_3 (t - t_2) + j_1 t_1 & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} (6.5-13)

式中：a_1、a_2、a_3 分别为三段的加速度。

速度为加速度的积分，因此可推导出速度的表达式见式 (6.5-14)

\begin{cases} v_1 = \frac{1}{2} j_1 t^2 & 0 < t \leq t_1 \\ v_2 = v_1 t_1 + j_1 t_1 \int_{t_1}^t t dt \\ & = \frac{1}{2} j_1 t_1 (2t - t_1) & t_1 < t \leq t_2 \\ v_3 = v_2 t_2 + \int_{t_2}^t a_3 dt \\ & = v_2 t_2 + \int_{t_2}^t [j_3 (t - t_2) + j_1 t_1] dt \\ & = j_1 t_1 \left(t - \frac{1}{2} t_1 \right) + \frac{1}{2} j_3 (t - t_2)^2 & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} (6.5-14)

式中：v_1、v_2、v_3 分别为三段的速度。

位置为速度的积分，因此可推导出位置的表达式见式 (6.5-15)

\begin{cases} x_1 = \int_0^t \frac{1}{2} j_1 t^2 dt \\ & = \frac{1}{6} j_1 t^3 & 0 < t \leq t_1 \\ x_2 = x_1 t_1 + \int_{t_1}^t v_2 dt \\ & = \frac{1}{6} j_1 t^3 + \frac{1}{2} j_1 t_1 \int_{t_1}^t (2t - t_1) dt \\ & = \frac{1}{6} j_1 t_1 (3t^2 - 3t_1 t + t_1^2) & t_1 < t \leq t_2 \\ x_3 = x_2 t_2 + \int_{t_2}^t v_3 dt \\ & = \frac{1}{6} j_3 t^3 + \frac{1}{2} (j_1 t_1 - t_2 j_3) t^2 + \\ & \quad \frac{1}{2} (j_3 t_2^2 - j_1 t_1^2) t + \frac{1}{6} j_1 t_1^3 - \\ & \quad \frac{1}{6} j_3 t_2^3 & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} (6.5-15)

式中： x_1 、 x_2 、 x_3 分别为三段的位移。

通过轨线发生器计算得到飞机预定运动轨迹 x_1 、 x_2 、 x_3 ，设定该类型飞机的弹射曲线。动子在运行过程中，从定子上排布的位置传感器得到实际位置曲线，从而进行比较，调节直线电动机定子绕组电流和电磁推力，使实际位置曲线与设定一致，弹射装置运控系统控制流程图见图 6.5-9。

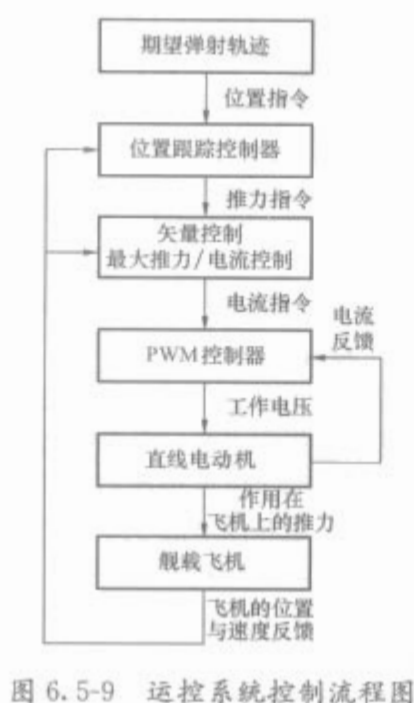


图 6.5-9 运控系统控制流程图

3 永磁无刷型电磁弹射器

高性能稀土永磁材料、大功率电力电子器件和电力电子技术的飞速发展，为永磁直线无刷电动机的广泛应用创造了良好的条件。近年来许多学者致力于将这种新型电动机作为弹射电动机应用到电磁弹射装置上，即永磁无刷型电磁弹射器。这种弹射装置由储能系统、动力调节系统、永磁直线无刷电动机、运控系统等四部分组成。

3.1 结构

永磁无刷型电磁弹射器的结构原理图见图 6.5-10。储能系统输出通过整流器整流后，形成直流供电网。通过弹射电动机的控制器，对逆变器的输出进行控制，形成三相方波电压，提供给弹射电动机。弹射器的“核心”是永磁直线无刷电动机，储能系统、动力调节系统和运控系统在 第 2 节 已做详细介绍，本节将不再赘述，重点将介绍弹射电机的结构和工作原理。



图 6.5-10 永磁无刷型电磁弹射器原理框图

弹射用永磁直线无刷电动机主要由电动机本体、位置传感器、电子换相电路组成，其中电子换相电路包括控制器和逆变器两部分。位置传感器检测动子的位置的信号，控制器对动子位置信号进行逻辑处理并产生相应的开关信号，开关信号以一定的顺序触发逆变器中的功率开关器件，将电源功率以一定的逻辑关系分配给电动机定子各相绕组，使电动机产生持续不断的推力。

3.1.1 电动机本体

考虑到弹射装置具有长距离、间歇性工作的特点，永磁直线无刷电动机的动子分别有片状次级和 U 型次级两种基本形状，见图 6.5-11。两种结构都各有优缺点。片状次级相对于 U 型次级，具有结构简单、质量轻、散热容易、利于制动，磁路相对合理等优点。而 U 型次级相对片状次级，

也具有机械强度高、抗污染能力较强等特点，可防止航空母舰甲板上的污水、盐雾、铁屑、螺钉等进入弹射电动机，可靠性相对较高，且弹射器的总重量较小。另外，片状次级由永磁体和隔磁材料构成，磁路在定子铁心上闭合；而 U 型次级的磁路在动子上闭合，因此动子上除了有永磁体和隔磁材料外，还需要有导磁材料（如铁），这大大增加了动子的质量，从而增加了制动装置的要求。

对于片状次级的动子，有两种不同的结构形式，如图 6.5-12 (a)、(b) 所示。图 6.5-10 (a) 所示的是基于常规充磁方向的永磁体结构，图 6.5-10 (b) 所示的结构是基于法向充磁磁体和切向充磁磁体组成的 HALBACH 结构。这两种结构的动子都不含有铁磁体。

对于 U 型次级的动子，有两种不同的结构形式，见图 6.5-12 (c)、(d)。图 6.5-12 (c) 所示的是基于法向充磁的永磁体结构，其中必须包含构成闭合磁路的铁轭。图 6.5-12 (d) 所示的结构是基于 HALBACH 磁体结构，含有铁心。在这种 Halbach 磁体结构中，动子也可以做成无铁心结构，磁链在永磁体中形成闭合回路，但考虑到 U 型动子需要承受飞机负载，动子无铁心结构不适合用于电磁弹射装置上。

对于表面式永磁电动机，定子齿部的涡流损耗与每极每相槽数 q 成正比。当 $q=1$ 时，定子绕组采用单层整距绕组，则磁部涡流损耗最小，定子电缆下线最方便。其结构示意图见图 6.5-13。

定子采用单层等距分布绕组，动子分别为片状和 U 型

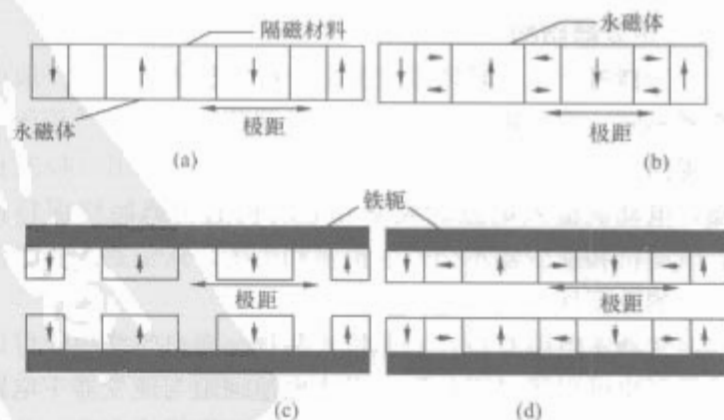


图 6.5-12 永磁无刷型弹射器弹射电机动子的四种具体结构

(a) 普通永磁体结构的片状动子；(b) HALBACH 磁体结构的片装动子；(c) 普通永磁体结构的 U 型动子；(d) HALBACH 磁体结构的 U 型动子

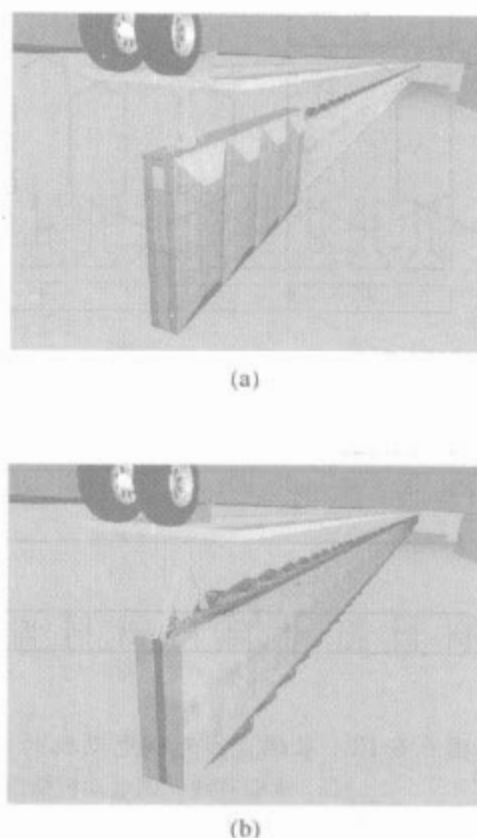


图 6.5-11 永磁直线无刷电动机的动子的两种基本形状

(a) U 型动子无刷型弹射器；(b) 片装动子无刷型弹射器

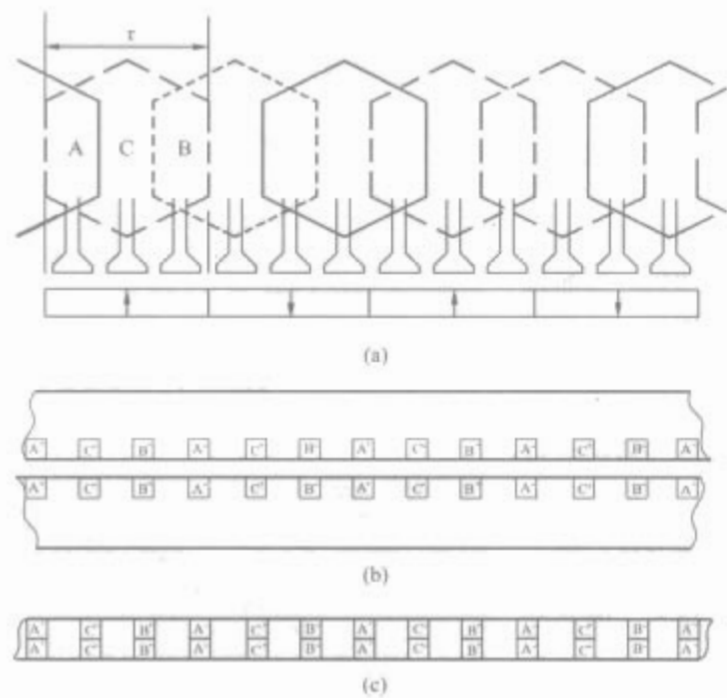


图 6.5-13 永磁直线无刷电动机的定子的结构示意图

(a) 永磁直线无刷电动机绕组连接图;

(b) 片状二次对用定子绕组; (c) U 型二次对应定子绕组

结构时, 电动机的磁力线分布见图 6.5-14。

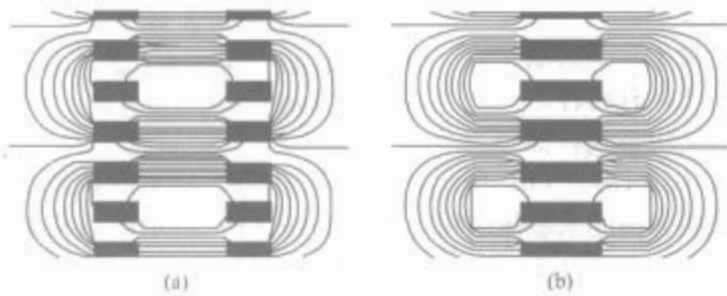


图 6.5-14 永磁直线无刷电动机的磁力线分布图

(a) 片装二次磁路结构; (b) U 型二次磁路结构

3.1.2 往复车位置传感器

位置传感器的作用是检测动子磁极相对于定子绕组的位置信号, 为绕组提供正确的换相信息。传感器的工作环境较为恶劣, 如工作温度在 $-30^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 之间、距离为 $0 \sim 100\text{m}$, 速度为 $0 \sim 100\text{m/s}$, 另外弹射装置内部的湿度、盐度、振动较大, 因而目前可应用在弹射装置的主要有模拟感应传感器和数字感应传感器。

模拟感应传感器通过测量与动子轨道底部连接的目标轮廓的厚度来实现。数字感应传感器的设计是建立在标准的转象差增量编码器的基础之上。

3.1.3 逆变器结构

逆变器将直流电转换成交流电向电动机供电。与一般的逆变器不同, 它的输出频率不是独立调节的, 而是受控于动子位置信号, 是一个“自控式逆变器”。由于采用自控式逆变器, 电动机输入电流的频率和电动机的转速始终保持同步, 电动机和逆变器不会产生振荡和失步, 这也是无刷直流电动机的重要优点之一。

逆变器主电路有桥式和非桥式两种, 而电枢绕组既可以接成星形也可以接成三角形, 因此电枢绕组与逆变器主电路的连接可以有多种不同的组合, 如非桥式和桥式电路。非桥式 (或称为半桥式) 电路的电枢绕组只允许单方向通电, 属于半控型主电路; 桥式主电路的电枢绕组允许双向通电, 属于全控型电路。用于弹射装置逆变器结构为桥式电路, 绕组采用星形连接, 见图 6.5-15。

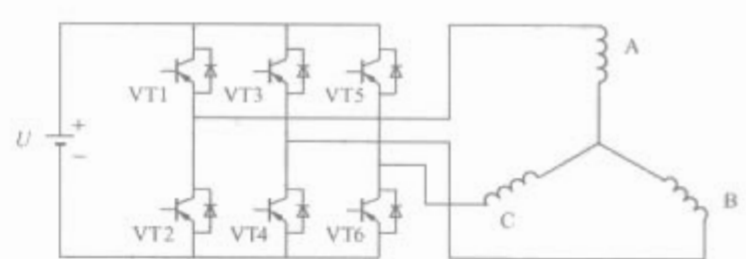


图 6.5-15 三相桥式星型连接电路

3.1.4 控制器

控制器是永磁直线无刷电动机正常运行并实现各种调速伺服功能的指挥中心, 它主要完成以下功能:

(1) 对动子位置传感器发出的信号、PWM 调制信号、动子前进后退和停车信号进行逻辑综合, 为驱动电路提供各开关管的斩波信号和选通信号, 实现电动机的控制。

(2) 产生 PWM 调制信号, 使电动机的电压随给定速度信号而自动变化, 实现电动机开环控制。

(3) 对电动机进行速度闭环调节和电流闭环调节, 使系统具有较好的动态和静态性能。

(4) 实现短路、过电流、过电压和欠电压等故障保护功能。

控制器的主要形式有: 分立元件加少量集成电路构成的模拟控制系统、基于专用集成电路的系统、数模混合控制系统和全数字控制系统。

3.2 工作原理

永磁直线无刷电动机的工作原理同普通的无刷直流电动机类似, 采用位置传感器指导电动机绕组换相。反电动势波形近似为梯形波, 磁链近似为正弦波。三相星形联接永磁直线无刷电动机原理图见图 6.5-17。电动机本体采用片状动子, 定子绕组为单层等距分布绕组。位置传感器布置于定子槽中, 控制电路对位置信号进行逻辑变换后产生驱动信号, 驱动信号经驱动电路隔离放大后控制逆变器的功率开关管, 使电动机的各相绕组按一定的顺序工作。逆变器采用 120 电角度导通方式, 即电动机任一时刻有两个功率管导通, 每隔 120 电角度电流从一相换到另一相。驱动大功率管的是恒幅的 PWM (Pulse Width Modulation) 逆变器的调制输出信号, 该信号经过放大后, 使对应的功率管开或关, 将直流电压变成幅值和频率可调的电压方波供给电机的定子绕组。随着动子的运动, 位置传感器不断的送出信号, 改变定子绕组的通电状态, 使得在某一磁极下导体中的电流方向始终保持不变, 这就是永磁直线无刷电动机的无接触式换流过程的实质。图 6.5-16 给出了无刷型电磁弹射器的整个换相过程。

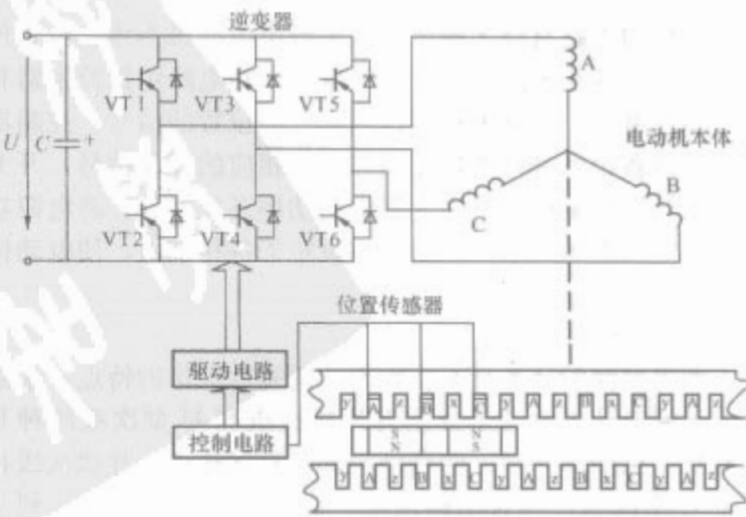


图 6.5-16 永磁直线无刷电动机原理结构图

当动子运动到图 6.5-17 (a) 所示的位置时, 位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器, 使功率管 VT1、VT6 导通, 即 A、C 两相绕组通电, 电流从电源的正极流出, 经 VT1 流入 A 相绕组, 再从 C 相绕组流出, 经 VT6 回到电源的负极。这时电流在动子上所产生的动力均为正方向, 动子向正方向运动。

当动子移动 60 度电角度, 运动到图 6.5-17 (b) 所示的位置时, 位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器, 使功率管 VT3、VT6 导通, 即 B、C 两相绕组通

电, 电流从电源的正极流出, 经 VT3 流入 B 相绕组, 再从 C 相绕组流出, 经 VT6 回到电源的负极。这时电流在动子上所产生的动力均为正方向, 动子向正方向运动。

当动子移动 60 度电角度, 运动到图 6.5-17 (c) 所示的位置时, 位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器, 使功率管 VT3、VT2 导通, 即 B、A 两相绕组通电, 电流从电源的正极流出, 经 VT3 流入 B 相绕组, 再从 A 相绕组流出, 经 VT2 回到电源的负极。这时电流在动子上所产生的动力均为正方向, 动子向正方向运动。

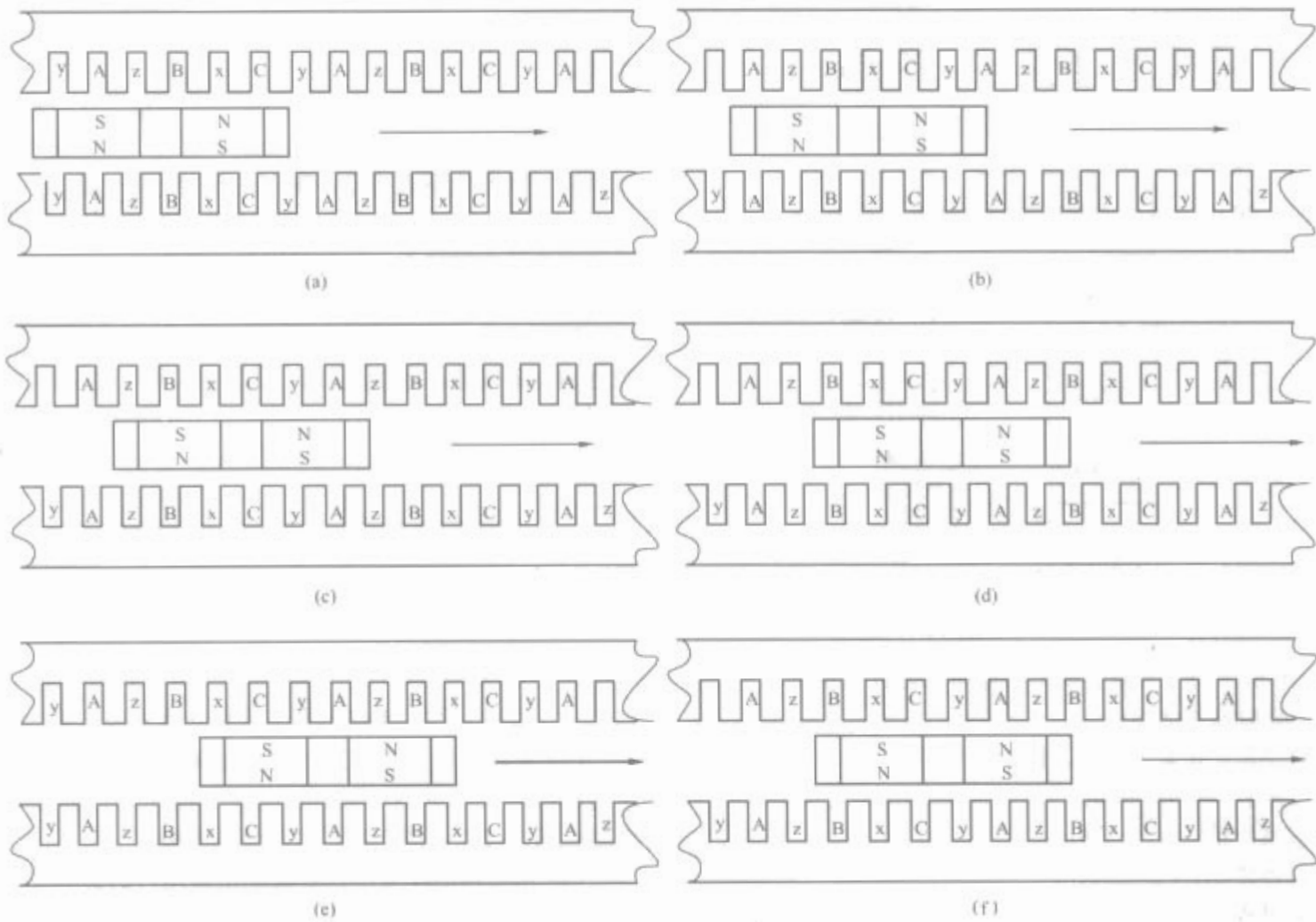


图 6.5-17 永磁直线无刷电动机工作原理图

当动子移动 60 度电角度, 运动到图 6.5-17 (d) 所示的位置时, 位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器, 使功率管 VT5、VT2 导通, 即 C、A 两相绕组通电, 电流从电源的正极流出, 经 VT5 流入 C 相绕组, 再从 A 相绕组流出, 经 VT2 回到电源的负极。这时电流在动子上所产生的动力均为正方向, 动子向正方向运动。

当动子移动 60 度电角度, 运动到图 6.5-17 (e) 所示的位置时, 位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器, 使功率管 VT5、VT4 导通, 即 C、B 两相绕组通电, 电流从电源的正极流出, 经 VT5 流入 C 相绕组, 再从 B 相绕组流出, 经 VT4 回到电源的负极。这时电流在动子上所产生的动力均为正方向, 动子向正方向运动。

当动子移动 60 度电角度, 运动到图 6.5-17 (f) 所示的位置时, 位置传感器输出的信号经控制电路逻辑变换后驱动逆变器, 使功率管 VT1、VT4 导通, 即 A、B 两相绕组通电, 电流从电源的正极流出, 经 VT1 流入 A 相绕组, 再从 B 相绕组流出, 经 VT4 回到电源的负极。这时电流在动子上所产生的动力均为正方向, 动子向正方向运动。

随着动子位置的变化, 各个开关管的状态和通电绕组见表 6.5-7。

表 6.5-7 开关管状态和通电绕组

动子位置	开关管状态						通电绕组
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	
(0, 1/3 τ)	1	0	0	0	0	1	A+C—
(1/3 τ , 2/3 τ)	0	0	1	0	0	1	B+C—
(2/3 τ , τ)	0	1	1	0	0	0	B+A—
(τ , 4/3 τ)	0	1	0	0	1	0	C+A—
(4/3 τ , 5/3 τ)	0	0	0	1	1	0	C+B—
(5/3 τ , 2 τ)	1	0	0	1	0	0	A+B—

图 6.5-18 给出了三相绕组理想的电流和对应的电磁推力波形。从图中看出, 电流正向通电和反向通电各 120 电角度, 每一时刻同时有两相同时导通。推力波动为 0.87 F_{\max} 到 F_{\max} , 峰均值比为 1.03, 满足电磁弹射器的技术要求(1~1.1)。

图 6.5-19 给出了永磁直线无刷电动机的控制框图, 逆变器采用 H 桥级联形式, 基本采用位置速度外环, 电流内环的闭环控制。

3.3 主要技术指标

根据弹射器间歇运行的特点, 直线电动机必须具有高效率、高可靠性、抗冲击强、高灵敏度。其主要技术指标如下:

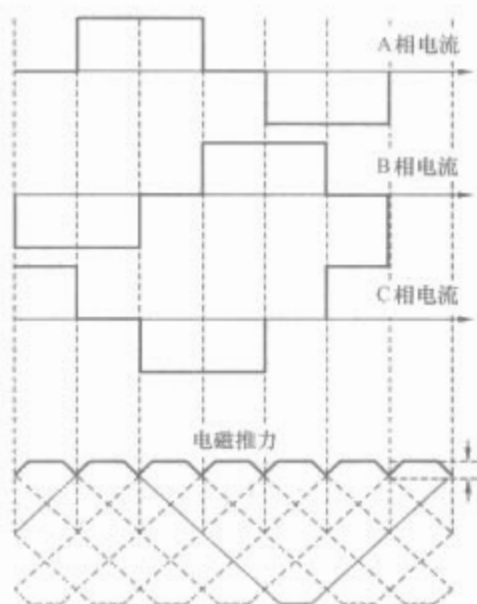


图 6.5-18 三相绕组理想的电流波形

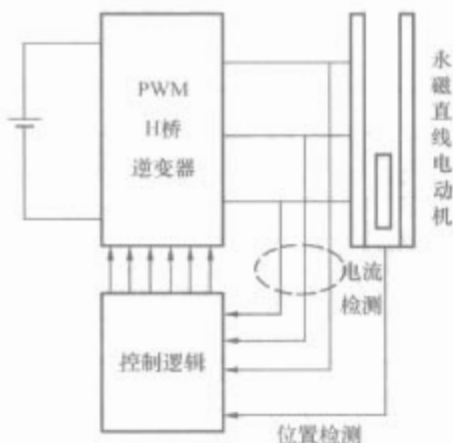


图 6.5-19 永磁直线无刷电动机的控制框图

(1) 弹射器总体指标。

系统功能：张紧、弹射、制动、复位

出动率：1.33 次/min。

弹射器质量： $G_{\text{all}} < 270\text{t}$ 。

弹射器体积： $V_{\text{all}} < 566\text{m}^3$ 。

弹射甲板承重： $G_{\text{bearing}} \geq 80\text{t}$ 。

(2) 储能系统指标。

最大输出能量： $E_{\text{out}} \geq 210\text{MJ}$ 。

循环周期： $t_c = 45\text{s}$ 。

(3) 动力调节系统指标。

输出频率： $f_n = 0 \sim 333\text{Hz}$ 。

输出电压：三相方波。

(4) 直线无刷电动机指标。

动子末速度： $V_f = 28 \sim 100\text{m/s}$ 。

飞机最大加速度： $a_{\text{max}} \leq 5.6\text{g}$ 。

定子弹射冲程： $l_f = 96\text{m}$ 。

直线电机能量效率： $\eta \geq 0.9$ 。

定子制动距离： $l_{\text{end}} = 6\text{m}$ 。

(5) 运控系统指标。

动力冲程峰均力比： $k = a_{\text{max}} : a = 1 \sim 1.05$ 。

末速度误差范围： $\Delta V_f = 0 \sim 1.5\text{m/s}$ 。

3.4 设计特点

长定子永磁直线无刷电动机与一般旋转电动机相比，设计计算大致相同，需要经过磁路计算、参数计算、电路计算、损耗和效率计算等几个部分。所不同的是设计长定子永磁直线无刷直流电动机时，要考虑大功率长定子直线的自身特点以及与一般旋转电动机的不同之处，主要表现为：

(1) 电机极数多，取每极每相槽数为 1；为便于布置绕组，长定子采用单层绕组。用电缆线直接埋入。

(2) 长定子永磁无刷电动机短时工作时，定子绕组电流密度可选得较大，一般最大可达 30A/mm^2 以上。

(3) 旋转交流电机的基辅效应系数 K_F 的计算公式不能用于直线电机，频率 $f > 30\text{Hz}$ 时，直线电机随频率变化的系数按式 (6.5-16) 取

$$K_F = 1 + 0.004(f - 30) \quad (6.5-16)$$

(4) 由速度公式 $v = 2f\tau$ 可知，频率增加时，速度增大，运行阻力必定增大，因此所需推力及电流须相应增大，即频率最大时运行阻力最大，相应的推力及电流的稳态值也将为最大。

(5) 由于铁耗近似与频率的 1.3 次方成正比，还与气隙磁密的平方成正比，而当飞机负载一定时气隙磁密不变，因此铁耗只随着频率而变化，频率最大时铁耗也最大；又由于铜耗与电流的平方成正比，而频率最大时电流稳态值最大，因此频率最大时稳态运行时的铜耗也最大。

(6) 由于永磁体的磁导率与空气相同，因此在磁场和磁路计算时，永磁体的厚度 h_M 要归并到气隙中，这个总的气隙称为电磁气隙，用 g_e 表示，见图 6.5-20。电磁气隙长度 g_e 值见式 (6.5-17)

$$g_e = 2g + h_M \quad (6.5-17)$$

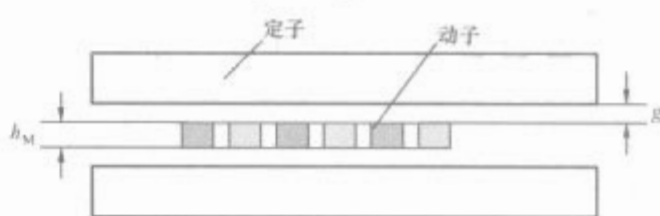


图 6.5-20 永磁无刷电动机等效电磁气隙

(7) 永磁直线无刷电动机采用高剩磁，高矫顽力的稀土永磁材料，如 NeFeB ， NeFeB 内嵌于动子中，提供恒定的励磁磁场。可以作成凸极，也可做成隐极。

(8) 永磁体的厚度不仅要满足正常运行的磁通要求，还应满足在最恶劣状况下不至于被永久退磁的要求。

(9) 制动时的能量公式为 $E = \frac{1}{2} m V^2$ ， m 表示动子质量，当动子重量增大时，制动所需能量增大，增加了制动装置的要求，从而要对动子重量施加限制。

(10) 当电动机沿径向展开后会带来边端效应，引起脉振磁场；电枢齿槽与永磁体之间会产生很大的齿吸力；电枢与轨道之间也会有较大的滑动摩擦。这些不利因素都会给直线电动机带来推力脉动。因此，在进行电动机本体设计时，要充分加以考虑。对于边端效应，可以考虑采用多极和采用补偿绕组的方法来克服；在减小齿吸力方面，可以采用无槽，改变永磁体宽与极距的比率，采用斜槽或斜齿，或综合改变气隙，永磁体高度，宽度，槽深来减小推力脉动。

(11) 为了保证飞机电磁弹射系统在飞行甲板出现预期变形时有足够的运行气隙，以及甲板受热膨胀以及装配公差 ($\pm 1\text{mm}$) 等，必须保证直线电动机的气隙 $\geq 6.5\text{mm}$ 。对于永磁电动机，由于剩磁大，并且恒定，因此气隙磁密较大。

(12) 永磁体的工作温度一般在 100°C 左右，在牺牲矫顽力和磁能积的情况下也有工作在 150°C 的永磁体，如果电动机散热不佳，瞬时温度高于 150°C 时，永磁体将会出现去磁的严重事故。

(13) 动子位置传感器按环境条件、安装精度及成本要求选择。

(14) 以脉宽调制 (PWM) 控制的电动机, 考虑到死区时间的影响, 最大工作速度时的反电动势最大值取供电电源电压的 65%~80%。

4 直线感应型电磁弹射器

直线感应型电磁弹射器主要由储能系统、动力调节系统、直线感应电动机、运控系统四部分组成。由于直线感应电动机的剪切力范围为 100~150kN/m², 永磁直线电动机的剪切力范围为 200~230kN/m², 因而两种弹射器的结构、尺寸将有很大的区别。

4.1 结构

直线感应型电磁弹射器的“核心”是直线感应电动机。直线感应电动机可以看作是旋转异步电动机的一种演变, 它可以看作是将一台旋转电动机沿径向剖开, 然后将电动机的圆周展成直线, 由定子演变而来的一侧称为一次侧或原边, 由转子演变而来的一侧称为二次侧或副边, 也称动子。直线感应电动机按照动子、定子结构的不同, 可以分为扁平形、圆筒形、盘形和弧形, 具体分类见图 6.5-21。按照气隙磁通闭合路径的不同, 可以分为轴向磁通和横向磁通。所谓轴向磁通, 即从直线电动机的定子产生的磁通通过动子导体的轴向方向在回到定子铁心上来, 见图 6.5-22 (a)。所谓横向磁通, 就是让定子产生的磁通从定子铁心的一侧穿过动子通过另一侧的定子铁心, 然后回到原来的一侧, 见图 6.5-22 (b)。



图 6.5-21 直线感应电动机的分类

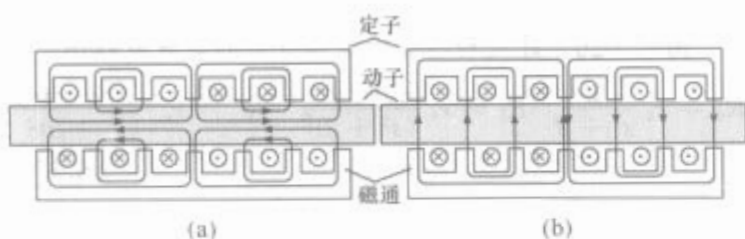


图 6.5-22 双边型直线电动机根据磁通通过方式的分类
(a) 轴向磁通式; (b) 横向磁通式

所谓单边型直线感应电动机, 即电动机仅在动子的一侧安放定子。这种结构的电动机在定子和动子间存在着一个很大的法向磁拉力。这个法向磁拉力在钢二次侧 (动子) 时通才为切向电磁推力的 10 倍左右, 在大多数情况下, 不希望存在这种磁拉力。如果在动子的两边都装上定子, 那就能使两边的法向磁拉力相互抵消, 这种结构即所谓的双边型直线感应电动机, 如图 6.5-23 所示。

为了保证直线感应电动机在所需行程范围内, 定子和动

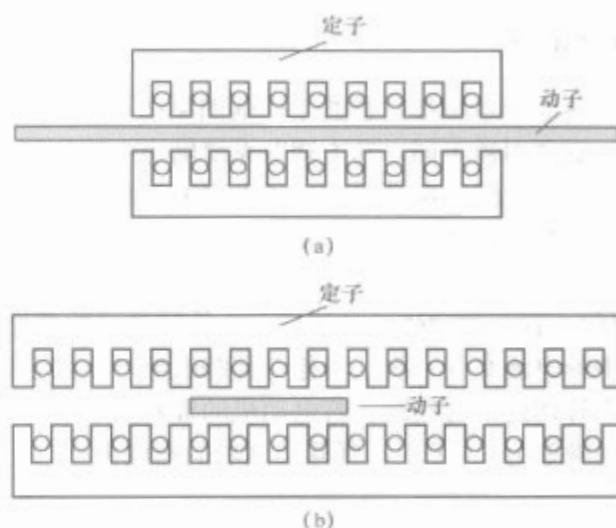


图 6.5-23 双边扁平型直线感应电动机
(a) 短定子; (b) 短动子

子之间的耦合关系始终能够保持不变, 因此在实际应用中, 必须将定子和动子制造成不同长度。在直线感应电动机制造时, 既可以是长定子、短动子结构, 也可以是短定子、长动子结构。对于电磁弹射用直线感应电动机, 由于功率极大, 只能采用长定子、短动子结构, 并采用定子分段供电的方式。

上述扁平型直线感应电动机是目前应用最广泛的。除扁平型直线电机这种结构外, 还可以做成圆筒型 (也称管型) 结构。将扁平型直线电动机沿横向卷成圆筒型便成了管型直线电动机。管型直线电动机的定子线圈为饼式线圈, 整个饼式线圈都是有效边, 没有端部, 所以绕组的利用率高, 这是管型直线电动机的一个优点。如将扁平型直线电动机的动子做成扁平的圆盘形状, 并使其能绕圆心自由转动, 同时将定子置于动子圆盘靠近边缘的平面上, 使动子圆盘的受力点做切向运动, 这种结构型式称为圆盘型直线电动机。如将定子做成弧形, 安放在动子圆柱面外侧的结构, 称为弧型定子柱面动子直线电动机。还可以将典型的圆盘型直线电动机的定子弯成与圆盘曲率一致的弧型, 称为弧型定子端面动子直线电动机。电磁弹射用直线电动机的运动形式决定了它不能采用圆盘型或弧型, 至于圆筒型直线感应电动机, 虽然可以成长定子短动子结构, 但由于弹射电动机需在动子上侧挂负载, 而圆筒型直线电动机不能在动子中间传递电磁推力, 因而直线感应型弹射器只能采用扁平型结构。

为了满足弹射系统的高可靠性, 弹射电动机必须采取冗余设计, 一般可采用多相或多组双边型直线电动机并联运行, 当其中一组发生故障, 不影响弹射的正常操作。由于常规直线感应电动机的定子绕组端部较长, 且高度较高, 为了便于弹射电动机的安装和航空母舰舱室布置, 可以采用克来姆 (Gramme) 环形绕组, 见图 6.5-24, 这种形式的电动机端部很短, 高度大为降低, 且所用导线量有所减少。为了减小谐波磁场, 降低动子谐波损耗, 电机还可以采用无槽形式。

这种电机结构带来的缺点就是背部、上下端部等线圈是无用线圈, 有用的线圈仅仅位于动子侧, 而无用线圈会对电机的磁路和航空母舰的通信系统带来不利的影响, 因此, 必须对无用线圈采取一定的屏蔽措施。

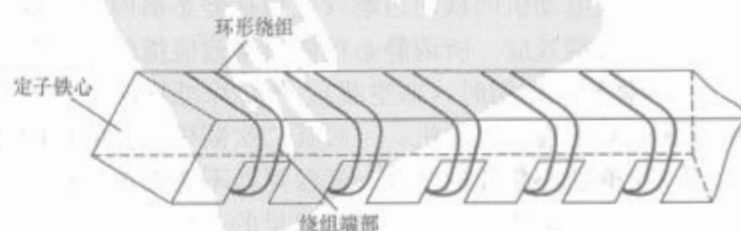


图 6.5-24 克来姆 (Gramme) 环形绕组

4.2 工作原理

直线感应型电磁弹射器的工作框图见图 6.5-25。与永磁无刷型电磁弹射器不同,动力调节系统输出电压为三相正弦交流电压。直线感应电动机的定子上嵌有三相绕组,当三相电流通入三相对称绕组时,与旋转电动机一样,在动子和定子之间的气隙中会产生一个移动磁场(对用于旋转电动机的旋转磁场),这个移动磁场的速度,由旋转磁场的理论可知,当绕组中的电流交变一次,三相对称绕组所产生的合成磁场在空间将移动过一对极距,若电动机的极距为 τ (m),电动机的供电频率为 f (Hz),则移动磁场的速度为

$$v_s = 2f\tau \quad (6.5-18)$$

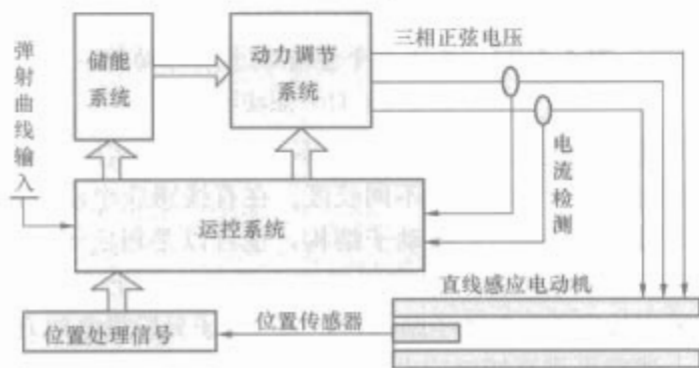


图 6.5-25 直线感应型电磁弹射器工作框图

在移动磁场的作用下,动子会产生感应电动势,由于定子是整块钢板或整块铜(铝)板制成,因此在导电板中会产生感应电流,这个感应电流和移动磁场相互作用,就会产生电磁推力,使定子和动子之间产生相对运动。如果将定子固定,则动子将会跟随移动磁场移动的方向运动,带动弹射器的“往复车”向前加速。与旋转电动机一样,运动部分的稳定速度 v 总是低于移动磁场的同步速度 v_s 。它们之间的关系也用转差率 s 表示

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \quad (6.5-19)$$

$$\text{即} \quad v = (1-s)v_s \quad (6.5-20)$$

与旋转电动机一样通过对换任意两相的电源接线,可以实现三相直线电动机的相反运动,根据此原理,当电磁弹射装置将飞机弹射起飞后,通过对变频器的控制,对换任意两相输入电压,“往复车”可以实现回收功能。

直线感应电动机的铁心在两端开断,安置在槽中的绕组在两端不连续,各相的互感也不相等,形成两个边端,它不像旋转电动机那样具有闭合的圆环形状。因此,行波磁场存在着一个“入口段”和一个“出口端”。这两个边端的存在对于电动机的气隙磁场的分布有显著的影响,直线电动机纵向两个边端对电动机的影响称为直线电动机的纵向边端效应。而与磁场移动方向垂直的宽度方向称为直线电动机的横向(与定子的槽方向一致),一般直线电动机的动子都用整块金属板制成,且宽度有限,因此,电动机存在横向边端效应。下面,就两种边端效应的产生及其抑制措施做详细叙述。

4.2.1 横向边端效应

直线感应电动机的横向边端效应包括静态横向边端效应和动态横向边端效应。所谓静态横向边端效应指的是二次侧(动子)导体板无作用时(即空载),气隙磁场横向分布不均匀的问题。对于直线电动机,一般其二次侧导体板的横向宽度大于一次侧铁心叠片的宽度,通常可以不考虑由于横向边端磁密分布不均匀所产生的主磁通总量的变化,即可以不考虑静态横向边端效应。次级横向每端伸出一侧长度一般约

为: $(1/\pi \sim 0.4)\tau$ 。

所谓动态横向边端效应,指的是当二次侧导体板中有电流流过时,二次侧导体板对气隙磁场沿横向分布的影响。二次侧横向端部伸出铁心长度电阻的存在,使得二次侧电流在有效长度内不仅有 y 轴(定子槽方向)方向分量,而且存在 x 方向分量,二次侧导体板中还有一部分电流在有效长度范围内就闭合了,这样,二次侧有效长度范围内电流将分布不平行,气隙磁密分布的形状将成为马鞍型分布。

横向端部效应的影响可以近似认为仅仅使二次侧电阻率有所增加。在进行定量计算时,只要把二次侧电阻率乘以一个恰当的修正系数 K_r 即可。计算值见式(6.5-21)

$$K_r = \frac{1}{1 - \frac{\tanh\left(\frac{\pi l_s}{2\tau}\right)}{\frac{\pi l_s}{2\tau} \left(1 + \tanh\left(\frac{\pi l_s}{2\tau}\right) \tanh\left(\frac{\pi c}{\tau}\right)\right)}} \quad (6.5-21)$$

式中: c 为二次侧导体片单边伸出一侧铁心的宽度; l_s 为一次侧铁心叠厚。

4.2.2 纵向边端效应

直线感应电动机的纵向边端效应包括静态纵向边端效应和动态纵向边端效应。由于直线电动机铁心在定子两端断开,各相之间互感不相等,因此而产生不对称的相电流。按照对称分量法,将相电流分解为正序、负序、零序电流。对应的磁场分别为正向行波磁场、负序反向行波磁场和零序脉振磁场,后两种磁场在二次侧运行过程中将产生阻力和附加损耗,这种现象成为直线电动机的静态纵向边端效应。为了消除这种影响,可以用增加电动机极数的方法来减小绕组互感之间的不对称。当极数 ≥ 6 时,可认为负序及零序电流相对正序已经足够小,影响可以忽略。对于双层绕组,还可以在电动机端部加补偿绕组来减小脉振磁场,用来改善静态纵向边端效应。

对于动态纵向边端效应,引入边端损耗对应的有效部分功率等效电阻 R_l 及无效部分功率等效电阻 R_L ,令 $R_e = R_l + R_L$,其表示纵向边端效应在二次侧上消耗的功率所对应的等效电阻折合到一次侧的电阻值。直线感应电动机的等效电路见图 6.5-26。

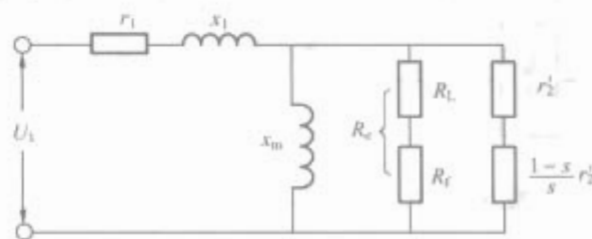


图 6.5-26 计及动态纵向边端效应的等效电路图

$$R_e = r_c \frac{1}{s^2 + \beta} \quad R_l = r_c \frac{s(1-s)}{(s^2 + \beta)^2} \quad R_L = r_c \frac{2s^2 - s + \beta}{(s^2 + \beta)^2} \quad (6.5-22)$$

其中

$$r_c = \frac{18}{\lambda} (2p + \epsilon)^2 L_s^2 N_{1P}^2 \quad \beta = \frac{3}{\epsilon^2 \pi^2} \quad \lambda = \frac{\epsilon \tau L_s \Delta}{K_r \rho_r}$$

式中: ϵ 为经验系数,取 $0.2 \sim 0.4$; s 为转差率; p 为极对数; K_r 为纵向边端效应系数; ρ_r 为二次侧电阻率; τ 为极距; Δ 为二次侧厚度; L_s 为二次侧导体宽度; N_{1P} 为定子每相每对极匝数。

4.2.3 电磁推力的求取

根据图 6.5-26 很容易求得一次侧每相感应电动势。直线感应电动机的电磁推力分为常规的中心区域电磁推力和考虑纵向边端效应时的边端区域电磁推力,即

$$F = F_c + F_e \quad (6.5-23)$$

其中,中心区域电磁推力

$$F_e=s\frac{m_1E_1^2}{r_2V_s} \quad (6.5-24)$$

式中: V_s 为同步速度; r_2 为图 6.5-26 中二次侧折算到定子的电阻。

边端效部分功率等效电阻 R_f 产生有效推力 F_e 。

$$F_e=\frac{m_1(E_1/R_e)^2R_f}{V_s(1-s)}=\frac{s m_1E_1^2}{r_eV_s} \quad (6.5-25)$$

根据 U_1 和 E_1 之间的关系,代入得到

$$F=\left(\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_e}\right)\frac{s m_1U_1^2}{\left[1+\left(\frac{s}{r_2}+\frac{s^2+\beta}{r_2}+\frac{1}{jX_m}\right)(R_1+jX_1)\right]^2V_s} \quad (6.5-26)$$

4.3 主要技术指标

对于直线感应型电磁弹射装置由于弹射电动机类型与永磁无刷型弹射装置不一样,导致弹射电动机的分段数目和长度、极距大小、供电电压波形和频率、效率将有所不同。

(1) 弹射器总体指标。

系统功能:张紧、弹射、制动、回收。

出动率:1.33次/min。

弹射器质量: $G_{all}<270t$ 。

弹射器体积: $V_{all}<566m^3$ 。

弹射甲板承重: $G_{bearingt}\geq 80t$ 。

(2) 储能系统指标。

最大输出能量: $E_{out}\geq 210MJ$ 。

循环周期: $t_c=45s$ 。

(3) 动力调节系统指标。

输出频率: $f_n=0\sim 120Hz$ 。

输出电压:三相交流。

(4) 直线感应电动机指标。

动子末速度: $V_f=28\sim 100m/s$ 。

飞机最大加速度: $a_{max}\leq 5.6g$ 。

定子弹射冲程: $l_t=97.6m$ 。

直线电动机能量效率: $\eta\geq 0.7$ 。

定子制动距离: $l_{end}=5.8m$ 。

(5) 运控系统指标。

动力冲程峰均力比: $k=a_{max}$; $a=1\sim 1.05$ 。

末速度误差范围: $\Delta V_f=0\sim 1.5m/s$ 。

4.4 设计特点

(1) 弹射用直线感应电动机一般采用双边平面型,见图 6.5-27。使用时应注意在任何瞬时一边的 N 极必须对准另一边的 S 极,这样可让垂直穿过动子的磁通路径最短。动子一般采用单纯的铝板或铜板,为非磁性二次侧(复合二次侧的铜板厚度大于 2mm、铝板厚度大于 4mm 均可以视为非磁性二次侧),这可使推力较大,并避免或减少法向磁拉力。

(2) 双边型直线感应电动机两边的定子绕组既可以采用并联连接,也可以采用串联连接。在实际的电磁弹射装置中,当动力调节系统输出电压较高,电流较小时,可采用串联连接;当输出电压较低,电流较大时,可采用并联连接。

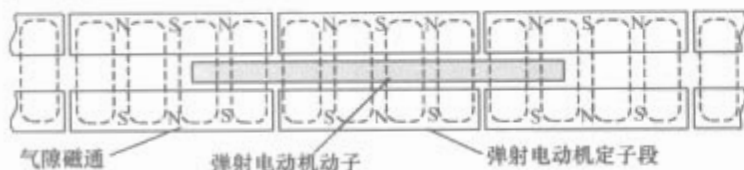


图 6.5-27 双边型直线感应电动机的磁通路径

(3) 为了保证电磁弹射装置的高可靠性,动子在长距离运动中,不与定子相擦,弹射电动机气隙一般要比旋转感应电动机做得大。直线感应电动机的励磁电流是与气隙 g 和极距 τp 之比成正比,在一般低速的直线电动机里,极距不是很大,增大气隙,就会增大励磁电流。这样会增加电气损耗及降低功率因数。在高速电动机里,由于极距 τ 较大,力能指标相对较高,见表 6.5-8。

表 6.5-8 180kW 直线感应电动机和 180kW 旋转异步电动机力能指标对照表

	直线感应电动机	旋转异步电动机
$\cos\varphi$	0.827 ($g=10mm$)	0.87
η	0.8	0.93
$\eta\cos\varphi$	0.66	0.81

(4) 对于非磁性二次侧,由于铜板或铝板等非导磁材料的导磁性能和空气相同,因此在磁场和磁路计算时,铜板和铝板的厚度要归并到气隙中,这个总的气隙称为电磁气隙,用 g_e 表示,见图 6.5-28。电磁气隙长度

$$g_e=2g+\Delta \quad (6.5-27)$$

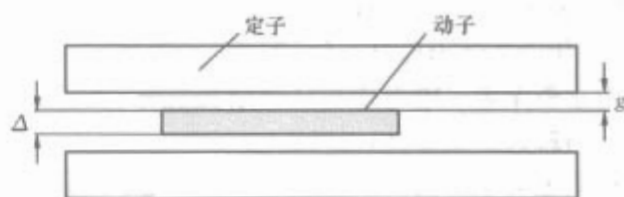


图 6.5-28 直线感应电动机等效电磁气隙

(5) 由于弹射电动机定子采用分段供电方式,在动子覆盖区域,电动机的等效电路见图 6.5-26。但在动子未覆盖区域,通电定子绕组无励磁电抗,而均为漏抗,这段区域会增加电动机的无功功率。由于定子绕组电流极大,瞬时可达上万安培,未覆盖区域铁心已经饱和,此时漏感的计算需要考虑磁路为非线性。

(6) 电磁弹射用直线感应电动机漏感较大,功率因数较低,效率低,决定了需要设计较大容量的动力调节系统,和较大输出功率的储能系统。

(7) 选取大的电磁负荷比。①弹射电动机定子直接暴露在空气中,散热条件好,且为间歇式工作,有承受大的热负荷的能力;②直线电动机的空气气隙大,必然选取较小的磁负荷,以尽量减小所需的磁化电流,达到提高功率因数的目的。但电磁负荷比不能过大,因为随着电磁负荷比的增大,漏抗增大,将会导致功率因数下降。电动机的设计应该以减小漏抗为中心,以提高功率因数为主,效率为辅。

(8) 弹射用直线感应电动机采用细、长、薄外形结构为最优,但设计相应的补强结构非常重要。

(9) 对于定子开槽的直线感应电动机,定子主要设计参数包括:槽宽(b_s),极距(τ),机械气隙(g),后两项可根据电动机的设计指标确定。当增大槽宽时,电动机的槽漏抗减小,电动机的功率因数增大;而增大槽宽,又使得卡特系数所确定的等效气隙增大,反而使电动机的功率因数下降,因而需要对电动机进行优化设计,找到最佳槽宽,使得直线感应电动机的力能指标 $\eta\cos\varphi$ 最优。动子主要设计参数包括:铝板厚度(Δ),延伸缘(c),延伸缘的长度在第 2 节中已经介绍。当减小铝板厚度时,电动机的力能指标得到提高,而电动机的电磁推力减小,因而也存在一个最佳动子厚度,使得在电磁推力满足设计要求的前提下,电动机的力能指标最优。

(10) 弹射用直线感应电动机具有较大的起动力矩而不需要辅助起动设备,并可实现大范围的加速和减速。

参 考 文 献

- [1] 吴仲阳主编. 自动控制理论. 北京: 高等教育出版社, 2005
- [2] 李发海, 王岩编. 电机与拖动基础. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [3] 天津电气传动设计研究所编著. 电气传动自动化技术手册. 清华大学出版社, 2005
- [4] 《电气工程师手册》第二版编辑委员会. 电气工程师手册. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [5] 汪晓平等. PLC 可编程控制器系统开发实例导航. 第1版. 北京: 人民邮电出版社, 2004
- [6] 廖常初. PLC 应用技术问答. 第1版. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [7] 王永华等编著. 现代电气及可编程控制技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002
- [8] 顾德英等编著. 计算机控制技术. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006
- [9] 成大先主编. 机械设计手册. 第四版: 第4卷. 北京: 北京化学工业出版社, 2002
- [10] 唐永哲编著. 电力传动自动控制系统. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998
- [11] 肖英奎等编. 伺服系统实用技术. 北京: 北京化学工业出版社, 2004
- [12] 徐薇莉等编著. 自动控制理论与设计. 上海: 上海交通大学出版社, 2001
- [13] 张敬刚等编著. 新编 MCS-51 单片机应用技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003
- [14] 杨树兴等编著. 计算机控制系统—理论、技术与应用. 北京: 北京机械工业出版社, 2006
- [15] 中国船舶工业总公司. 船舶设计实用手册—电气分册. 北京: 国防工业出版社, 1997
- [16] 船舶设计实用手册: 第六分册, 冷藏通风. 北京: 国防工业出版社, 1971
- [17] 赵殿礼主编. 船舶辅机电气控制系统. 大连: 大连海事大学出版社, 2003
- [18] 郁永章主编. 容积式压缩机技术手册. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [19] 张燕宾编著. SPWM 变频调速应用技术. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [20] 韩安荣主编. 通用变频器及其应用. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [21] 李惠昇主编. 电梯控制技术. 第1版. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [22] 尔桂花, 窦日轩编著. 运动控制技术. 第1版. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [23] D Patterson, A Monti, T Bertoncelli, C Brice, R Dougal, et al. Design and simulation of an electromagnetic aircraft launch system. Proceedings of IAS, Pittsburgh, October 2002, pp: 1951~1957
- [24] (美) Bimal K. Bose 著, 王聪、赵金、于庆广等译. 现代电力电子学与交流传动. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [25] 叶云岳主编. 直线电机技术手册. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [26] 中国电机工程学会. 机械工程手册、电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册. 第2版: 第3卷, 电机卷. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [27] 陈世坤主编. 电机设计. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [28] 唐任远主编. 现代永磁电机理论和设计. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [29] Javier Rios Quesada, Jean-Frederic Charpentier. Finite Difference Study of Unconventional Structures of Permanent-Magnet Linear Machines for Electromagnetic Aircraft Launch System. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, no. 1, January, 2005, pp: 478~483
- [30] 傅丰礼、唐孝镐主编. 异步电动机设计手册. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [31] 龙遐令著. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法. 北京: 科学出版社, 2006

第7篇 综合船桥系统

主编单位：上海海事大学
海军工程大学
上海船舶运输科学研究所
上海造船厂

主 编：薛士龙 许江宁 陈永冰 张 敏 林云生

编写人员：薛士龙(上海海事大学)
许江宁(海军工程大学)
陈永冰(海军工程大学)
张 敏(上海船舶运输科学研究所)
林云生(上海造船厂)
卞鸿巍(海军工程大学)
朱 涛(海军工程大学)
胡柏青(海军工程大学)
覃方君(海军工程大学)
胡东亮(海军工程大学)
周永余(海军工程大学)
孙振宇(海军工程大学)
付 军(海军工程大学)
李文魁(海军工程大学)
周 岗(海军工程大学)
华梅堂(上海船舶运输科学研究所)
张欢仁(上海船舶运输科学研究所)
沈玉祥(上海船舶运输科学研究所)
张丹瑞(上海船舶运输科学研究所)
陆锦辉(上海船舶运输科学研究所)
向 阳(上海海事大学)
沈爱弟(上海海事大学)
徐善林(上海海事大学)
陈意惠(上海海事大学)
崔庆渝(上海海事大学)
蒲小莲(上海海事大学)
沈玉霞(上海海事大学)

第1章 概述

综合船桥系统(Integrated Bridge System)是一种集成系统,是在综合导航系统(Integrated Navigation System)基础上发展起来的一种海上自动航行系统。它综合应用多种现代技术,将船舶上的导航、通信、操作、显示、安全与报警等设备有机地组合在一起(以船桥为中心安装放置各种设备),实现船舶的自动操舵、自动监控和自动航行。本章主要介绍了综合船桥系统的发展背景、定义、原理、功能、组成和发展趋势等方面的基本内容。

1 背景

早期的航海导航是以航海人员为中心,根据航海设备(如平台罗经、电罗经、计程仪、雷达、罗兰C、台卡等)的信息,作出引导船舶航行的判断。这种传统的导航方法,由于设备安装独立,分立显示,缺乏必要的综合技术和手段,容易造成信息过载。这样不仅增加了操作人员的工作压力和精神负担,也影响其做出正确的判断。随着国际远洋运输业的迅速发展和运输成本的增长,对船舶航行技术也提出了更高的要求:要求船舶在全球、全天候以及复杂气象水文条件下能够安全航行;要求船舶具有最优航线规划功能;要求提高船舶操作自动化水平等。因此,人们对集成化、自动化程度更高的航行系统要求日益紧迫。现代科学技术的迅速发展及其在船舶工业中的运用,为综合导航系统和综合船桥系统提供了强有力的支持。综合导航系统以计算机为中心,通过信息融合和综合处理,将船舶上各分立导航设备形成一个有机整体。综合船桥系统则是对综合导航系统的改进和扩展,将船舶的导航、通信、控制、操作、显示、安全与报警等功能综合为一个系统,形成了一个船舶智能控制中心,实现船舶的安全、经济和自动航行。

自20世纪60年代世界第一套综合船桥系统面世以来,综合船桥系统已取得了长足发展。初期的综合船桥系统只具有导航功能,综合程度也较低。在第二代综合船桥系统产品中,增加了航行计划和航迹保持/自动操舵两个子系统,系统从原来的导航功能扩展控制功能,成为综合导航和控制系统。目前,在最新一代综合船桥系统产品中,通信功能也成为系统一重要部分,综合船桥系统已发展成集导航、控制、显示、监视、管理和通信功能为一体的综合航行系统,日益成为现代船舶的重要组成部分。

2 定义

根据1996年国际海事组织IMO(International Maritime Organization)对综合船桥系统性能标准(Performance Standard)要求,综合船桥系统被定义为“一种内部互联的复合系统,它通过对各传感器信息、命令或控制工作站的集中式访问,以实现在人工配合下提高船舶的安全性和船舶管理的有效性”。符合该定义的综合船桥系统应该具备以下两种或更多的功能:制定航线;通信;操作控制;

装卸和货物控制;安全告警。

随着综合船桥系统不断发展,其概念的内涵和外延都发

生了一定的变化。因此,我们认为,综合船桥系统是一种以计算机为中心,以信息融合理论为基础,以船舶为控制对象的内部互联的集成系统,它综合应用计算机、现代仪器仪表、现代控制、网络、信息融合等多种现代技术,将导航、通信、控制、操作、监视、显示、安全与报警等设备有机地组合在一起,以提高船舶航行的安全性、经济性、有效性和自动化水平。

3 基本原理

综合船桥系统是一种由综合导航系统发展而来的功能更大的综合航行系统,其基本工作原理是:以计算机为中心,进行信息采集、状态检测和控制计算,减轻人员的工作压力和精神负担,提高船舶自动化水平;以信息融合理论为基础,进行信息加工和综合处理,减少信息过载,提高系统可靠性和精度;以船舶为控制对象,确保船舶沿最佳航线航行,并能自动检测和判断危险目标,并实施有效的控制措施,以提高航行的经济性和安全性。

(1) 以计算机为中心。传统航海导航以航海人员为中心,根据各种航海设备的信息,发出引导船舶航行的各种指令。由于航海信息种类繁多而人工信息处理能力有限,在实际应用存在较大局限性。综合船桥系统充分利用现代计算机技术发展的成果,采用以计算机为中心的方式,增强了系统的信息检测、采集、处理和计算的能力,提高了系统自动化智能化水平。

(2) 以信息融合理论为基础。多传感器信息融合技术是指通过一定的算法合并来自多个信息源的信息,以产生比单个传感器所得到数据更可靠、更准确的信息,并做出更可靠的决策。信息融合技术的采用能够扩展整个系统的时间、空间覆盖率,增加系统的信息利用率并提高融合数据的置信度和精度。在船舶综合船桥系统中,通过信息融合理论,将各部分有机结合在一起,而不是简单组合叠加,进行信息综合处理,可以一定程度上弥补人工处理信息能力的局限,提高系统的精度。

(3) 以船舶为控制对象。综合船桥系统是由综合导航系统发展而来的。综合导航系统只是各种航海信息来源和信息融合的载体平台,并不以船舶为控制对象。与综合导航系统不同,综合船桥以船舶为控制对象,是全船自动化的重要组成部分。它包括了航行管理系统、主机遥控系统、自动驾驶系统和安全与报警系统等,能为船舶航行提供优化航线,能自动检测、判断和报警,并实施有效的控制措施。

4 基本功能

(1) 航线与航行计划的制定。主要工作是负责航线的产生及相关航行计划的制定。依靠综合船桥系统,首先选定作为航行计划制定基础的地理区域的系统电子海图数据库,并随时直观地显示于高分辨率彩色显示屏上,然后选择合适的航线,给出航途基准点的安排命令,制订航行计划。整个过程可由用户通过鼠标、键盘、操纵杆直接在电子海图上完成,最后综合船桥系统负责航线的存储与航行计划的生成,

并可随时显示或打印。

(2) 定位与导航。综合船桥系统由于采用多种导航设备及信息处理方式,综合利用导航设备的信息互补性,使得输出的导航信息精度高于单一导航设备的精度,同时系统配备有高精度卡尔曼滤波器,接收处理各种定位设备如雷达、罗兰 C、GPS、惯导系统等送来的航行信息估量,可以进一步提高定位与导航精度,从而可提高船舶按计划航线运行的航迹保持精度。

(3) 航行操作与控制。船桥系统的航迹控制器能实时监测实际船位与计划航线所提供的预定船位的偏差,通过预先设定的航迹控制模式精确计算,在修正航向模式下产生和发送驶向转向点的修正航向命令,使驾驶系统对航向修正并使船舶精确航行在预定的航线上,并能实现航行中的自动避碰和自动避礁。

系统中的驾驶系统是微机控制的自适应数字自动舵,高速微机的应用使其能根据航行管理系统所提供的实时海况、本船速度和装载情况迅速识别船舶操纵运动的数学模型和干扰模型,自动改变舵角,提供给定航向的最佳舵角控制。

(4) 通信功能。综合船桥系统各子系统间要不断地进行数据交换,信息的传输途径非常重要。20 世纪 90 年代初,综合船桥系统充分吸收了计算机通信网络技术发展的成果,通过环型数据通信网络将综合系统内部的导航传感器、避碰雷达、航行管理系统、自动驾驶系统等各部分系统连接起来,成功地解决了系统内部的数据通信问题。比如,美国斯佩里公司生产的综合船桥系统采用令牌环形局域网,经过网络接口单元将各分系统连接起来。该系统已安装在“林肯号”航空母舰、巡洋舰和其他大中型舰船上。目前,通信技术已成为充分发挥综合船桥系统效率的重要支撑力,也成为综合船桥系统实现船舶航行全自动化的重要推动力,是第三代综合船桥系统产品必不可少的功能。

(5) 遥控监测与自动报警。由于依靠先进的信息网络,采用了以高速微机为中心的自检功能和智能化管理,系统能对导航传感器、电子海图、通信系统等的工作状况,对主、辅机或机舱内其他设备乃至装载、救生系统的工作状况以及航行事件实施在线实时监控。一旦发生故障,特别是危及安全时,会立即声光报警,自动实施应变,并提醒驾驶人员采取措施。

5 基本组成

综合船桥系统的基本组成如下:

(1) 航行管理系统。航行管理系统是综合船桥系统中的心脏,由航行工作站、航行命令站、航行计划站、海图数字化仪等组成。

1) 航行工作站。航行工作站是航行管理系统的输入部位,有些系统也称之为航行数据录取器,具有输入电子海图、本船机动特性、编制航行计划的能力。主要包括以高速 CPU 芯片为主处理器的微机计算机系统,并有硬盘驱动器、键盘和彩色图像控制器等。

2) 航行命令站。命令站是航行计划的执行部位,它产生和发送航向、航速命令,综合显示各传感器信息及电子海图和实施综合船桥系统的监控。该命令站的航迹控制器还能根据实际船位与计划航线提供的预定船位间的偏差及风流压力等,向驾驶系统发出命令,给出信息保持或修正误差信息,使船舶精确航行在预定航线。

3) 航行计划站。该计划站主要功能是输入各种类型的

电子海图,通过数字化仪将纸型海图转换为电子海图,进行航行计划的编制,设置航路点及船舶的航行参数等。

4) 海图数字化仪。海图数字化仪能将录取海图上的岛屿岸线、水深等各种特殊符号信息转化为数字形式存储于硬盘或软盘,并方便地显示于高分辨率显示器上以形成电子海图。

(2) 导航传感器。导航传感器为综合船桥系统提供必需的航行信息,通常由下述导航设备组成:

1) 雷达/ARPA(避碰雷达系统)。通常包括 2 台可相互转换的带有雷达自动标绘仪 ARPA 的高分辨率光栅扫描雷达,具有 S 波段和 X 波段 2 个发射波段,配有高性能微处理器,能接收存储本显示航行管理系统送来的航线图,并可向雷达显示器发送。

2) 电罗经。主要用作船舶航向信息的测量,一般由主罗经、电子控制/发送单元及航向记录器等组成。

陀螺罗经系统应符合 IMO 的 Res. A424 CXD《陀螺罗经的性能标准》,具有速度和纬度误差补偿功能。在 ECDIS 系统中,一般选用双罗经系统。

3) 多普勒计程仪(速度测量子系统)。主要用作船舶速度信息的测量,通常由电子箱、显示器、三波束换能器组成,可提供双轴速度、航行里程和深度数据。

多普勒计程仪应符合 IMO 的 Res. A824 (19)《航速和航程指示装置的性能标准》。

4) 定位子系统。主要用作船舶定位信息的测量,常见设备有全球定位仪(GPS)、台卡接收机、罗兰 C、子午仪等。特殊用途的船舶和军船的综合船桥系统中,也时常配备惯性导航系统以自主提供船舶定位和舰船姿态角信息。

(3) 自动驾驶系统。综合船桥系统中驾驶系统使用的是由高速微机控制的自适应数字自动舵。它由控制面板和电子单元部分组成,采用双速控制电路,以处理航向和航行数据,产生相应的舵角命令。自动舵具有手动、随动、自动、导航、跟踪和遥控等驾驶模式,同时接收航行管理系统发出的航向命令和航迹保持误差信息,根据航迹保持误差和本船航速信息对输入的航向命令作出修正,从而使船舶精确地按计划航迹航行。

(4) 数据通信网络。新一代的综合船桥系统的数据通信通常采用记录环数据通信网络,该系统的突出特点是具有传统数据通信网络所无法比拟的可靠性。

传统的数据网络结构如总线结构、星体结构都受中央处理单元控制。一旦中央处理单元发生故障,就会殃及整个系统。

记录环数据通信网络是一种符合电气电子工程协会 IEEE 802.5 标准的完全分布式的高速数据通信网络。它通过网络接线中心,以网络接口单元为节点,将接入系统的各种设备同网络媒介连接成双向循环网络,使系统具有充分的冗余度。由于网络各节点都具有完善的自检测功能,可全时监测网络上的数据及其发送控制,一旦担负发送控制的现役节点失去控制功能后,各节点就能自动接替工作,从而保持数据通信网络始终处于正确可靠运转的工作状况。

(5) 主机遥控系统。主机遥控即离开机旁对主机进行远距离操纵的工作方式,主要包括集控室遥控和驾驶室遥控两种形式。综合船桥系统中的主机遥控系统属于后者。驾驶室遥控为自动方式,操纵人员只需操动一次车钟手柄,自动化设备就会根据主机当时的运行状态,自动依照主机的操纵规律,实现主机工况的自动控制与变换,直到主机运行状态同车钟指令完全一致为止。主机遥控不仅可以大大减轻机舱

人员的劳动强度,而且可以减少误操作,改善船舶的操作性能,提高主机运转的可靠性和经济性,从而提高船舶的安全性。主机遥控是机舱自动化的重要组成部分,也是无人机舱的必备条件之一。

(6) 机舱自动化系统。机舱自动化系统主要完成机舱内有关设备的监视、控制与报警输出。20世纪50年代末,反馈控制理论在船上已经得到了广泛应用,使得机舱里的所有运行参数实现自动控制成为可能,在此基础上出现了机舱集中监视和参数越限报警系统。目前,机舱监控系统已从原来单机集中式监控、多机分散式监控发展到以网络技术应用为

特征的网络控制阶段。监控系统通过对机舱内主机、发电机组、柴油机冷却水温度、燃油黏度、液位、自清洗滤器、分油机、油水分离器、曲柄箱油雾等实时在线监视与控制,当有关参数异常时,自动启动应急程序,同时通过安全报警系统发出声光报警信号,提醒操作人员采取必要应对措施。机舱自动化系统已成为全船自动化的极为重要的组成部分。

两种典型的设计方案分别如图7.1-1、图7.1-2所示。

两者主要的区别在于后者采用了环形数据网络技术,通过网络接口将避碰雷达、航行管理系统、自动驾驶系统、导航传感器等各部分连接起来,特别适用于大型军民船舶。

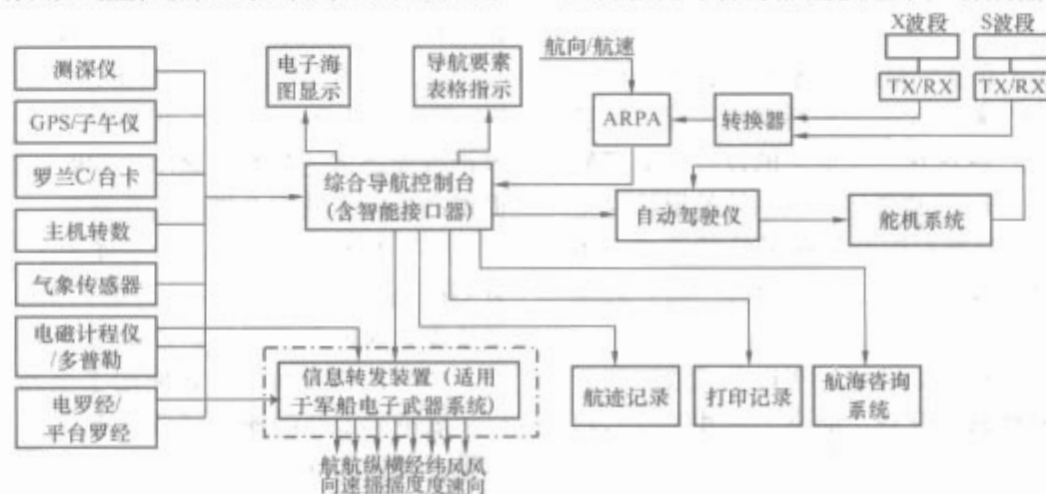


图 7.1-1 综合船桥系统设计方案原理框图



图 7.1-2 综合船桥系统设计方案原理框图

6 典型产品

6.1 美国斯佩里公司 VT2100 型综合船桥系统

美国斯佩里公司研究生产综合船桥系统的时间已经超过10年,目前全世界已经有超过325套斯佩里公司生产的综合船桥系统产品装配在各类民用和军用舰船上。斯佩里公司可以根据不同用户的需求生产制造出相应的综合船桥系统。但一套综合船桥系统其基本配置包括以下几个部分:

(1) 航行规划工作站(planning station)。航行规划工作站负责完成航线的生成及相关航行计划的制定。传统上,制定与绘制航线并据此作好详细的航行计划是开航前船舶驾驶员的例行工作。由于目前的ECDIS、ENC(Electronic Navigational Chart)提供包括灯标、通航分割制、VTS、沉船等多级信息检索,也就是说,诸多资料已融合在ECDIS或ENC中,因此,完全有能力在航行规划工作站上进行基于海图的航行计划设计操作。

(2) 导航工作站,也称电子海图信息显示系统(EC-

DIS)。导航工作站向操船人员提供包括船舶航行状态(如航向、纵摇、横摇、航速、航迹向)、气象水文、船舶自身工作状态、避碰目标等信息。

(3) 船舶控制信息显示(conning display)。船舶控制信息显示提供完成计划航线以及船舶临时机动、泊岸/进港所需要的船舶控制信息。

(4) 自动操舵控制系统(autopilot steering control system)。自动操舵控制系统工作在船舶自动航行状态下,实现按照预定航线控制船舶航行的功能。

(5) 船桥电子雷达系统(bridgemaster E radar system)。船桥电子雷达系统是船舶避碰目标的重要系统,船桥电子雷达系统探测航线上的所有目标,实时提供避碰信息。

(6) 环形激光陀螺惯性导航仪(ring laser gyro inertial navigator)。环形激光陀螺惯性导航仪是提高现代船舶导航精度,降低导航成本的一种新型导航仪。它能够自主提供船舶航行状态信息,辅助船舶导航。

(7) 测速系统(speed log system)。测速系统用于实时测定船舶航行速度。

(8) 数据通信网络 (data communication network)。数据通信网络是综合船桥系统区别于传统船桥的关键。数据通信网络实现了在综合船桥系统内任一工作站的信息共享,是实时监测船舶航行状态和船舶自身工作状态、控制船舶按照预定航线航行、快速实施避碰,实现安全航行的保证。

斯佩里公司生产的 VT2100 型综合船桥系统可以认为代表了国内外综合船桥系统当前的发展水平。图 7.1-3 是斯佩里公司生产的 VT2100 型综合船桥系统分布图。

6.2 德国 STN 阿特拉斯电子公司的新一代综合船桥系统

德国 STN 阿特拉斯电子公司是世界著名的综合船桥系统生产厂商,近年来推出了新一代综合船桥系统产品——船舶控制中心。它的数字化、标准化、集成化的设计保证了船舶在各种变化条件下安全、经济的营运。该系统的设计完全符合德国船级和挪威 DNV 标准对综合船桥系统的要求,由于其设计先进、操作灵活、安装方便、自动化程序高,故深受用户好评。其主要功能特点有:

(1) 制订航行计划。各种计划站可以实现全球数字航行计划,包括存储和处理航线的转变点、曲率半径和航线的轮廓、计划航线及雷达地图,可以自动地传送到雷达单元和航迹控制系统。

(2) 自动航迹控制。集成航迹控制系统可以根据预先设

定的罗经航向、航迹 (包括偏航角),以及根本稳定的航法 (包括曲率半径) 实现船舶计划航线的直接控制。在雷达显示屏上的显示以及直接操纵控制以干预自动航迹控制过程均是在同一个独立工作场所进行,故操作极为方便。

(3) 航海信息显示。船舶操纵所需的数据 (如: 位置、航向、速度、偏航角、水深、气候、舵角、主机、转速、相对设定航向、航线、航行计划的偏差,以及主机全部主要数据) 均能在 NCC 上以航行信息的形式显示。

(4) 船舶避碰。高分辨率光栅扫描雷达、卓越的 ARPA 标准雷达可以有效地保证船舶避碰。而且借助于航迹控制系统的帮助和雷达图像的地理坐标,船舶操纵的实现十分方便。

(5) 具有带电子海图的雷达。由于采用 ECDIS 和 ARPA 雷达图像叠加产生了新的航海单元——多功能导航仪,该设备能将雷达数据与显示中的航迹信息直接进行比较,从而提高导航上的安全性和实现避碰。

(6) 具有多传感器。由于使用了三轴多普勒计程仪、差分 GPS 定位传感器,以及其他高精度测量设备,从而保证了速度、航向和位置信息数据的可靠性。

(7) 其他方面。比如使用了全新集成通信 DEBE93020 以形成准确及时的通信网络,使用了主机遥控系统 Geamost 保证了柴油机正常工作和运行,采用了集成船舶控制系统 Geama, 以实现货舱、船舶操纵和船舶运行数据的管理等。



图 7.1-3 斯佩里公司生产的 VT2100 型综合船桥系统分布图

第2章 船舶主机遥控

本章所述船舶主机遥控系统是指船舶主推进装置控制监测系统，它是综合船桥系统的一部分。一般包括主机遥控、监测报警和安全保护三大部分。遥控系统控制主推进装置按操作指令可靠运行；监测报警系统对主推进装置运行过程中各设备的工作状态及参数进行测量、显示、报警、记录、查询、打印；安全保护系统对推进装置在投入运行前及运行中出现的危及主机等重要设备安全的故障采取应急措施，对推进装置甚至船舶提供必要的保护。

在20世纪60年代以前，船舶主推进控制监测系统重点是发展主要设备的单元自动化。到了70年代前后，电子技术、计算机技术的发展给舰船主推进控制监测系统带来了一场革命，舰船推进装置监控系统的发展经历了从单个中央集控装置到分布式小型机/微机再到现场总线网络系统。这种全数字、全分散和全开放式的局域网络型推进装置监控系统的发展，开创了难以预计的生命力。计算机网络技术的发展，通信可靠性的大大提高，现场总线网的出现又使控制与监测都可集成于一个监控系统之内，实现分散控制，集中管理。以现场设备控制层和机电操作管理层组成的二层网络模式，是当前船舶推进装置监控系统以及机舱自动化技术水平的发展标志。

1 船舶主机遥控系统工作模式及控制要求

1.1 船舶主推进装置运行模式

1.1.1 船舶主推进装置的组成

船舶主推进装置是指使船舶产生推进力的相关设备。发动机（也称主机）发出动力，通过传动设备及轴系驱动推进器产生推力。船舶主机有可反转式的低速柴油机、中速柴油机、汽轮机；不可反转式的低/中/高速柴油机、汽轮机、燃气轮机。传动设备有离合器、减速齿轮，可反转减速齿轮，水泵（喷水推进），发电机—电动机（电力传动）。推进器有定距桨、调距桨、喷水推进器等。图7.2-1为各种组合的推进装置。



图 7.2-1 发动机—传动设备—推进器的各种组合的推进装置

1.1.2 船舶主推进装置的功用

船舶主推进装置也就是船舶主动力装置，它包括为船舶

提供推进动力所需要的设备、系统（推进机组、功率传递系统和推进器）以及为其服务的有关系统（推进保障系统和控制与监测系统）。

推进机组是指产生推动船舶航行所需动力的有关设备，常称为主机。目前船舶上常用的推进机组有推进汽轮机、推进柴油机、推进燃气轮机、电力推进装置以及由这些不同类型发动机组成的联合推进装置。船舶主推进装置的配置方式根据船舶的性质、吨位大小、任务使命及技术的先进程度不同而有多种形式。除了常用的单机单桨、多机多桨推进方式外，随着船舶使用需求的多样化以及船舶设计、制造及配套技术的不断提高，还出现了各种推进机组交替或联合推进的配置方式。目前舰船上已有应用的联合推进装置有以下几种形式：

- 1) 汽轮机和燃气轮机的联合推进（COSAG）。
- 2) 柴油机和燃气轮机的联合推进（CODAG）。
- 3) 柴油机或燃气轮机的交替推进（CODOG）。
- 4) 燃气轮机或燃气轮机的交替推进（COGOG）。
- 5) 燃气轮机和燃气轮机的联合推进（COGAG）。
- 6) 柴油机和柴油机的联合推进（CODAD）。

功率传递系统和推进器的基本任务是将主机的功率传递给推进器，同时又将推进器产生的推力经过推力轴承传给船体，以推动船舶运动。主要包括离合器、齿轮传动装置、联轴器、轴、轴承和推进器等。

推进保障系统即辅助管路系统。主要包括燃油、滑油、蒸汽、循环水、冷却水、压缩空气和进排气管系等，以及在这些管系中包含的设备，如燃油泵、滑油泵、空气压缩机等。辅助系统的基本任务是保障推进装置各设备能正常稳定地运行。

主推进装置控制和监测系统，包括遥控系统、监测报警系统和安全保护系统。这些系统的基本任务是实现对船舶主推进装置的远距离自动控制，现场数据采集运行状态监测，参数越限报警，信息显示保存以及推进设备的安全保护等。

1.1.3 船舶主推进装置的运行模式

船舶主推进系统运行模式有以下几种分类：

1) 根据采用的推进主机类型可分为：汽轮机推进运行模式、柴油机推进运行模式、燃气轮机推进运行模式、电力推进运行模式、核动力推进运行模式和联合推进运行模式等。

2) 根据采用的推进器类型可分为：定距桨推进运行模式、可调桨推进运行模式、喷水推进运行模式等。

3) 根据机桨的配置可分为：单机单桨运行模式、双机单桨运行模式、三机单桨运行模式、双机双桨运行模式、三机三桨运行模式、四机双桨运行模式等，某些小型船舶上，也有采用单机双桨运行模式的。

4) 根据运行的工况可分为：正常运行模式、应急运行模式、巡航运行模式（也称港内运行模式）、风浪运行模式等。

尽管有些民用船舶仍使用蒸汽轮机或燃气轮机作为主机，但目前船舶推进装置广泛使用二冲程和四冲程柴油机作

为主机。下面所说的主机除特别说明外一般为柴油推进主机。

1.2 操作部位、操纵方式和操作部位转换

1.2.1 主推进装置控制系统的操作部位

现代自动化程度较高的舰船，操作人员可以在以下部位对主推进装置实施操纵。

- 1) 驾驶台，包括左、右侧翼控制台。
- 2) 集控台。
- 3) 机旁控制板。

控制系统通过这些操作部位得到控制指令，然后控制推进装置各设备上的执行驱动装置，如主机的主起动阀、调速器，齿轮箱离合器的电磁阀以及调距桨的螺距比调节装置等，使主推进装置安全、可靠运行。

1.2.2 主推进装置控制系统的操纵方式

一般的主推进装置操纵方式有以下几种：

- (1) 全自动操作模式。操纵手柄具有传令和发讯复合功能，控制系统按预定规则和算法自动向控制对象发出各种控制命令。
- (2) 半自动操作模式。操作手柄仅具有传令作用，控制系统根据人工操作指令向控制对象发出各种控制命令。
- (3) 手动操作模式。也称为机旁操作模式。操作人员在机旁直接手动控制。

以上 (1) 和 (2) 两种操作模式一般在驾驶台、集控台实现，(3) 操作模式一般在机舱实现。

在这几种操纵方式下可以实现以下的基本功能：

- 1) 主机的起动、停车、调速、换向（对于可逆转的主机）。
- 2) 离合器的接合、脱开。
- 3) 调距桨的螺距控制。
- 4) 辅助机械的起停控制。

船舶主推进装置控制监测系统操作部位、控制方式及控制功能关系见表 7.2-1。

表 7.2-1 操作部位、控制方式及控制功能关系

操纵方式	操作部位及功能		
	驾驶室	集控室	主机机舱
全自动操作模式	机桨联动、接排、脱排、换向	机桨联动、接排、脱排、换向	—
半自动操作模式	—	起动、停车、调速、接排、脱排、换向、调距	—
手动操作模式	—	—	起动、停车、调速、接排、脱排、换向、调距

1.2.3 操作部位的转换

船舶主推进装置的操作部位是可以根据需要随时进行转换的。操作部位的转换应遵循以下原则：

- (1) 请求和确认。操作部位的转换一般应有指令请求和指令确认的过程，不能自动进行或由单个操作部位进行。这个转换过程一般由两个操作部位的操纵人员通过副车钟完成。
- (2) 声光警示和联锁。操作部位的转换一般应有声光警

示。无论是请求转换部位还是确认转换部位，均应有含义明确的声光标志，直至转换过程完成或终止。转换过程中，控制系统应锁定原操作部位，直到确认转换过程结束，才确认新的操作部位。

(3) 运行状态无扰动。操作部位的转换应保证主推进装置的运行状态无明显扰动。因此，控制系统一般要求转换部位的操纵手柄处于相同位置时，才允许进行操作部位转换。对于一些智能化程度较低的主机遥控系统，一般要求操纵人员将操作手柄放在相同的位置后，才给出转换确认指令。对于智能化程度较高的计算机主机遥控系统，它具有状态自动跟踪能力。因此在进行操作部位转换时，根据用户的需求，当操纵手柄位置不一致时，可以禁止转换，也可以在操作人员确认指令后，控制主推进装置从当前的运行状态，平稳过渡到当前操纵手柄要求的运行状态。

当从“驾驶室”或“集控室”操作部位转换至机旁时，操作人员应特别注意主机的调速手轮（或其他操纵设备）位置，防止主机转速（负载）有大的波动。

(4) 优先级。除正常转换外，操作部位还具有优先级。一般集控室优先于驾驶室，机旁优先于遥控。理论上，在应急情况下，集控室可以无条件将操作部位从“驾驶室”转换至“集控室”，机旁可以无条件从“遥控”（驾驶室和集控室）转换至“机旁”。但实际上，为了防止运行状态突然大幅度变化给主推进装置造成不必要损害，应急转换时操作人员仍应注意操纵手柄或机旁操纵手柄的位置，但不必经过请求和确认的过程。

一般在主机机旁操作板上和集控台上设置“机旁/遥控”及“驾驶/集控”转换开关，确保两个操作部位的优先级。

1.3 控制系统与控制对象接口

主推进装置控制监测系统一般包括主机遥控、监测报警和安全保护等系统。控制对象一般包括推进机组、功率传递系统、推进器和推进保障系统等。

为保证推进系统满足船舶总体性能所要求的运行工况，保证提供各工况要求的功率，保证推进系统在各工况下运行处于良好稳定的状态，控制系统和控制对象二者之间应有良好的接口。

1.3.1 控制系统与主机的接口

目前船舶上采用的常规推进机组有柴油机、汽轮机、燃气轮机和由这些机组组成的联合推进装置以及电力推进装置，但最广泛使用的推进系统采用的是二冲程和四冲程柴油机作为主机。

(1) 逻辑控制接口。如图 7.2-2 所示。

1) 起动。船舶主机的起动控制为：控制系统发出起动命令的电信号，通过起动电磁阀，给主机的主起动阀以 0.7MPa 的控制空气，打开主起动阀，使高压空气进入气缸，推动主机转动。达到发火转速之后控制系统切断起动空气，控制燃油供给。主机在燃油的燃烧作用下维持运转。

2) 正常停车。船舶主机的停车过程为：控制系统发出停车命令的电信号，通过停车电磁阀，给主机的停油伺服器（停油气缸）以 0.7MPa 的控制空气，将油门拉杆强制顶到停油位置，切断燃油供给，主机停止运转。

3) 故障停车。船舶主机的故障停车过程为：控制系统自动发出故障停车命令的电信号，通过故障停车电磁阀，给主机的停油伺服器（停油气缸）以 0.7MPa 的控制空气，将油门拉杆强制顶到停油位置，切断燃油供给，主机停止运转。

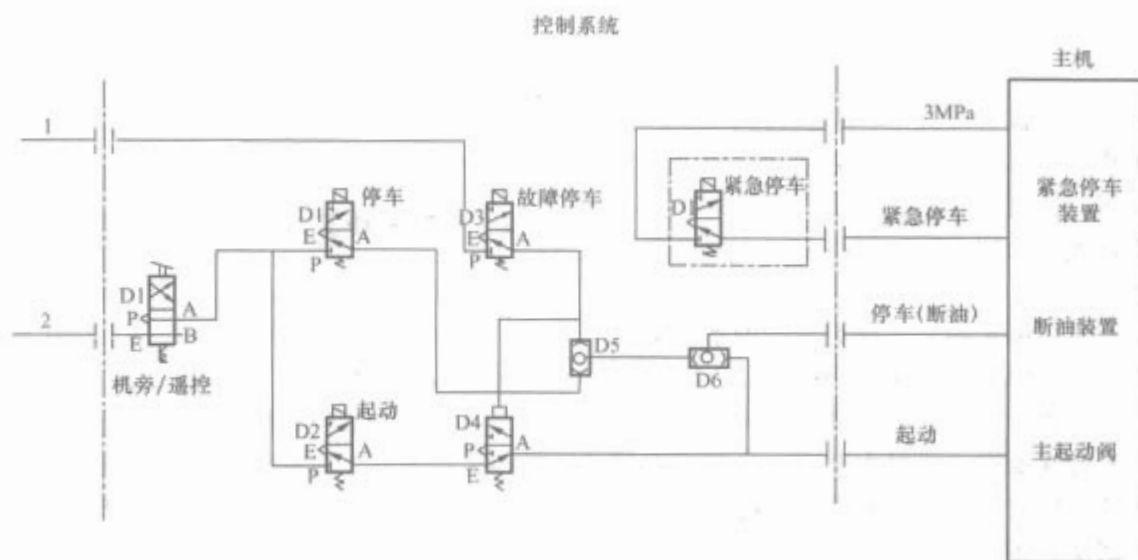


图 7.2-2 控制系统与主机的逻辑控制接口图

4) 紧急停车。紧急停车分为手动紧急停车和自动紧急停车两种，但不论哪种方式，控制系统均发出紧急停车命令给紧急停车电磁阀，紧急停车电磁阀动作，3MPa (30bar) 的压缩空气通过超速滑阀进入喷油泵的油道，将燃油吹走，同时进油口关闭。柱塞销将柱塞锁在底部位置以防柴油机重新起动，燃油系统保持切断状态。当引起超速的原因被排除，需要机旁手动复位才能重新起动主机。

(2) 转速控制接口。控制系统与主机的转速控制接口方式，根据调速系统的配置方式不同而分为两类。

1) 配置机械/液压式调速器。在这种方式下，主机转速由机械/液压式调速器调节。一般机械/液压式调速器的转速给定信号为0~1.0MPa范围内的气压信号，对应空车转速至最大转速。控制系统通过电/气转换器输出转速给定信号。

2) 配置电子调速器。电子调速器一般由控制部分和执行部分组成。电子调速器可以是一个独立的设备，接受主机遥控系统给出的与要求的主机转速相对应的电信号，如4~20mA或0~5V，由电子调速器调节主机实际转速。也可以是遥控系统包含了电子调速器的控制部分，主机配备执行机构的方式。控制系统根据转速偏差，经过控制运算，输出油门位置信号，由执行机构驱动并保持燃油杆位置。有时，执行机构还是一个带后备控制的机械/液压调速器的执行机构。这时，控制系统与主机的转速控制接口就有两个信号，即转速给定信号和油门位置给定信号。转速给定信号为后备控制信号。

(3) 转速测量接口。常用转速测量方法主要有：磁电式、光电式。

磁电式测速装置由电磁传感器和安装在轴系上的齿盘组成。当主轴转动时带动齿盘旋转，齿牙通过传感器时引起电路磁阻变化，经过放大整形后形成一个方波电脉冲，通过控制系统计算得到转速值。

一般来说，控制系统需要多路独立的主机转速信号，用于转速控制、安全保护、监测报警及车钟记录仪等。

(4) 油门位置测量接口。油门位置的测量过程是通过测量装置把凸轮轴的角度位移信号转换为控制系统需要的电信号。目前船上使用的油门位置测量装置主要有以下两种：

接触式：把主动齿轮装在调速器输出轴上，从动齿轮带电位器，使电位器阻值跟随油门拉杆位置变化而变化。

非接触式：探测器将油门拉杆位置变化转化为磁通量变化。

油门位置测量装置将燃油杆位移信号转换为标准电信号4~20mA或0~10V送给控制系统。

(5) 相继增压控制接口。有些机型柴油机采用相继增压方式，相继增压器由基本增压器和受控增压器组成，每个增压器由同一根排气管汇集各缸排气向蜗轮进口供气。

相继增压的工作过程：当柴油机处于低负载时，控制系统关闭装于压气机出口的空气阀和装于蜗轮机进口的燃气阀，只有一台基本增压器工作，称之为1TC工作状态；当柴油机高负载时，控制系统打开装于压气机出口的空气阀和装于蜗轮机进口的燃气阀，受控增压器投入运行。两台增压器同时工作，称之为2TC工作状态。

相继增压控制功能可以包含在主机遥控系统中，也可以由独立的控制系统实现。

(6) 智能机旁控制装置。有些场合，主机配套了智能型的机旁控制装置。这些智能机旁控制装置具有主机控制、监测、安全保护的基本功能。遥控系统只需要把控制命令（起动、停车、转速给定）发给智能机旁控制装置，由智能机旁控制装置来完成主机的起动、停车和转速调节，同时智能机旁控制装置将采集到的主机运行参数传送给遥控系统。

1.3.2 控制系统与离合器/齿轮箱的接口

离合器是船舶传动装置一个很重要的传动设备，它的作用是在主动轴旋转时将从动轴接合或分离，从而实现传递或阻断主机功率的功能。按传递扭矩的方式，离合器可分为摩擦片离合器、液力偶合器和电磁离合器等。

(1) 摩擦片离合器接口。摩擦片离合器的主要特点为在接合后的稳定工作中，主动轴和从动轴之间没有相对滑动，传动效率高。

摩擦片离合器的工作过程：控制系统发出接合的触点信号，通过电磁式或液压式的执行机构带动从动摩擦盘作轴向移动并压紧主动摩擦盘，从而完成离合器接合的全过程（该过程时间约为0.3~0.7s）；若需要离合器脱开，只要控制系统释放接合的控制命令即可，脱开过程的时间也为0.3~0.7s。

控制系统除了发给离合器接合/脱开的控制信号外，还接收离合器接合/脱开的实际状态信号。主机起动前，如果离合器在接排位置，则禁止主机起动；当主机接排运转时，如果出现离合器工作油压过低时，必须迅速脱离离合器。

(2) 液力偶合器接口。液力偶合器的主要特点为泵轮和蜗轮之间没有机械联系，靠液体环流传递动力，主从动轴存在速度差（即滑差）。

液力偶合器的工作过程：控制系统给充油电磁阀发出充油信号，由电磁阀来控制供油装置对液力偶合器充油（充油时间约为40~150s），建立一定压力后可传递扭矩；放油过

程需要控制系统给放油电磁阀发出放油信号,放油时间约为25s。

控制系统除了发给液力耦合器充油/放油的控制信号外,还接收液力耦合器工作的实际状态。主机起动前,若液力耦合器充油阀在充油位置,则发出起动联锁报警信号,禁止主机起动;系统运行中,当液力耦合器油温高或液力耦合器冷却阀关闭,应立即故障停车。

(3) 齿轮箱接口。船用齿轮箱是一种重要的轴系传动设备,它将发动机的功率传给螺旋桨,实现间接传动。船用齿轮箱往往集合了离合器、盘车装置、轴系刹车及轴转速测量等多种功能设备。具有传递推进主机最大功率,承受推力的能力。可以使主机转速与螺旋桨转速得到理想匹配。可实施并车和分车,实现正倒车、多速比传动,具有盘车、锁轴等功能。

控制系统对它的主要控制信号有:离合器的接合与脱开、备用滑油泵的起停等控制信号。

由于齿轮箱的滑油一般靠机带滑油泵供给,因此主机未起动或低速时,控制系统发出备用滑油泵的起动信号。当主机接排后转速达到某一规定值时,控制系统应停止备用滑油泵。齿轮箱运转工作中,一旦出现滑油低压,则控制系统应立即报警,然后起动备用滑油泵,如果滑油压力过低,控制系统将立即自动停机。

下列与齿轮箱相关的信号一般用于主机的保护:

起动联锁:离合器未脱开,齿轮箱滑油进口低压,齿轮箱盘车机在盘车位置,齿轮箱锁轴装置在锁轴位置,齿轮箱冷却水泵未运行。

接排联锁:齿轮箱锁轴装置锁轴。

故障降速:齿轮箱轴承高温。

故障脱排:离合器工作油压低。

故障停车:齿轮箱滑油压力低压(与轴转速相关)。

1.3.3 控制系统与调距桨的接口

调距桨一般自成一套控制系统,包括操作发讯部分和随动控制部分。调距桨控制系统与主机遥控系统的整合,需要系统设计人员根据用户使用需求,从操纵、功能和控制各方面合理取舍和匹配。

对于动力装置配置较简单,以调桨为主要使用需求的系统,可以以调距桨控制系统为主导,主机遥控系统仅负责主机起动、停车、安全保护等逻辑控制功能,转速调节、负载程序控制及机桨匹配等控制功能由调距桨控制系统实现。调距桨控制系统根据操作指令要求及机桨匹配要求,输出主机转速给定信号及负载限制信号给主机遥控系统。

对于动力装置配置较复杂,以调机为主要使用需求的系统,一般以主机遥控系统为主导,主机遥控系统负责整个动力装置的运行控制、安全保护和相互协调。在这种方式下,调距桨控制系统作为动力装置中的局部设备,接受主机遥控系统的桨角指令,执行调距桨的随动控制。

遥控系统与调距桨控制装置交换的信号有:

1) 螺距给定信号。控制系统根据机桨联控曲线输出螺距给定信号,由调距桨控制装置来控制实际的螺距。

在调距桨控制装置发生故障时,控制系统可以通过后备控制信号,直接操纵调距桨电液伺服系统的控制电磁阀,进而控制螺距的增减。

2) 工作方式设定(单泵/双泵运行方式)。若调距桨的工作油泵为机带泵时,当转速较低时,双泵运行向桨毂供油,当轴转速达到一定值后,单泵运行向桨毂供油。

3) 螺距反馈信号。

4) 零螺距信号。调距桨在此位置时,推力为零。为了保证主机在安全状态下起动,一般情况下,桨角零位信号作为主机起动联锁条件或者作为主机接排联锁条件。

5) 其他用于监测的信号。

1.4 控制系统基本工作原理及组成

船舶主机遥控系统通常以驾驶室和集控室为主要操作部位,应急时转为机旁控制。根据自动化程度的高低,分为周期无人值班机舱和有人值班机舱。

通常主机遥控系统应独立于安全保护系统和报警系统,当其他系统发生故障时,不能影响控制系统的正常工作。控制系统中可对控制设备的灵敏度和极限值等设定值进行调节及现场修改。遥控系统的电源应馈自主配电板或应急配电板(若设有时)。主电源失电时仍有必要的供电措施。控制系统失电时,应发出报警。控制系统气源应由专用的空气压缩机供气,并有相应的减压阀、过滤器和干燥器等措施,保证气源的干净。

图7.2-3是代表当前自动化技术水平的典型主推进装置控制监测系统网络结构图。

船舶主推进装置控制监测系统主要由下面几部分组成:

(1) 车钟系统。

1) 主车钟。主车钟由装在驾驶室的主车钟发讯器和装在集控室的主车钟接收器组成。主车钟的主要作用是将驾驶室驾驶人员的操纵指令传递到集控室,并将集控室轮机人员的响应反馈到驾驶室,起到上下联络的作用。主车钟手柄的位置表示了要求的船舶航行状态。如果主车钟上下位置不一致,车铃就会响,直到上下位置一致为止。

随着技术的发展,目前的主车钟大多将车令发讯和主机操纵功能合二为一,称之为复合车钟。车令一般为有级信号,分为8~11挡,主机操纵信号一般为无级信号,输出给控制系统作为控制指令信号。

2) 副车钟。副车钟由安装在驾驶室的副车钟发讯器和安装在集控室的副车钟接收器组成。

副车钟的作用与主车钟类似,也是起上下联络的作用,只是主车钟传递的是车令信号,而副车钟传递的是一些操作方式指令,一般有“备车”、“完车”、“驾控”、“集控”、“机旁”等信号。

副车钟一般为旋钮或按钮式。旋钮指示的位置表示操作人员要求的操作指令或操作部位。它的工作方式与主车钟类似,即当上、下旋钮位置不一致或按钮选择不一致,车铃声响,提示操作人员注意,直到上、下位置一致为止。副车钟的信号也输出给控制系统作为操作部位信号。

3) 应急车钟。应急车钟系统由装在驾驶室的应急车钟发讯器和装在机舱的应急车钟接收器组成,有些船舶在集控室装有应急车钟复示器。顾名思义,应急车钟是为紧急情况下机旁操作时在驾驶室和机舱之间传递车令而设置。

应急车钟一般为旋钮式,旋钮指示的位置表示要求的船舶航行状态。如果上、下旋钮位置不一致,车铃声响,直到上、下位置一致。驾驶台应急车钟发讯器和机舱应急车钟接收器旋钮的位置都会在集控室应急车钟复示器上显示。

4) 车令记录仪。车令记录仪用于记录和打印驾驶室驾驶人员每一次操作发出的车钟命令(主车钟和应急车钟的命令)以及车令变化时、车令变化后30s时及3min时的主推进装置工作参数,一般有下列参数:车令变化时间、发出的车令、实际轴转速等参数,对于可调桨还有实际螺距。

(2) 遥控系统。遥控系统一般由操作显示单元、控制单

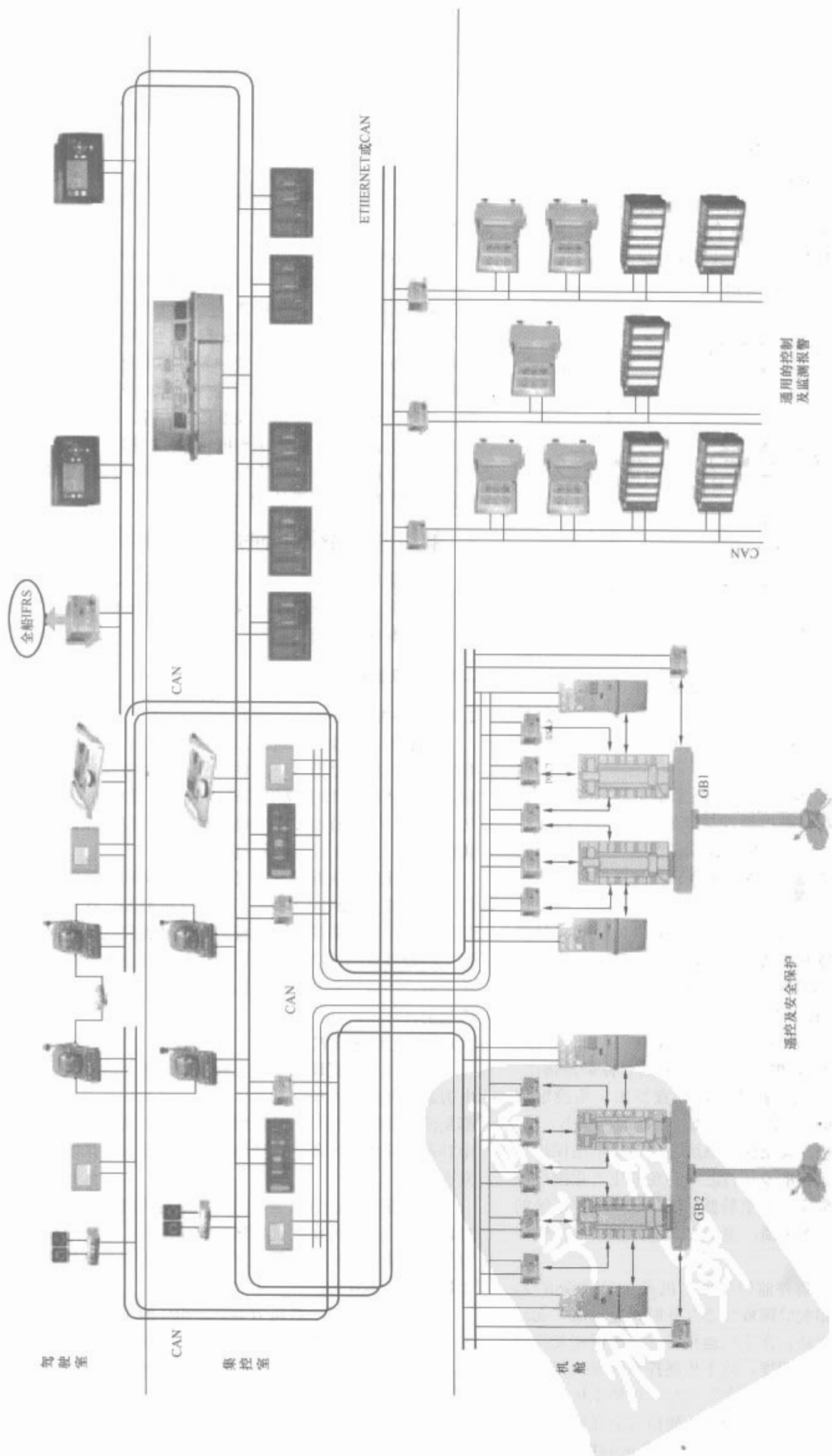


图 7.2-3 STI-VC2100 推进监控系统网络结构图

元、执行单元及信号检测单元等几部分组成。得益于电子技术、计算机控制技术和现场总线通信技术的发展,对于大型船舶或动力装置配置较复杂的船舶,由于设备布置分散,控制要求高,主机遥控系统由集中型装置发展为分布式计算机控制系统。按设备划分、与被控对象密切结合的控制器分布在机舱中。由现场总线将它们连接,实现分散控制、集中管理。图 7.2-4 表示的就是一个分布式遥控系统的组成原理框图,它由遥控控制器、柴油机控制器、齿轮箱控制器和可调桨控制器四大部分组成。其中所有控制器由相同硬件模块组合而成,这些模块有电源模块、CPU 模块、输入输出模块和通信模块。控制器的连接方式为 CAN 现场总线。



图 7.2-4 遥控系统组成原理框图

1) 遥控控制器。遥控控制器根据车钟等命令,经过控制决策程序计算判断,向柴油机控制器输出主机转速给定等信号,向齿轮箱控制器发出接/脱排指令信号,向可调桨控制器发出螺距给定值。通过网络模块向上层网提供推进装置的运行参数。

2) 柴油机控制器。柴油机控制器采集主机的实时参数(如转速、油门位置等),根据遥控控制器的目标转速指令,经过控制程序运算后,向主机发出控制调节信号。柴油机控制器还负责主机的起动停车,通过 CAN 网向遥控控制器传送主机的运行参数。

3) 齿轮箱控制器。齿轮箱控制器采集齿轮箱的实时参数(如轴转速、接脱排状态等),根据遥控控制器的接脱排指令,经过控制程序运算后,向齿轮箱发出接脱排控制信号。通过 CAN 网向遥控控制器传送齿轮箱的运行状态。

4) 调距桨控制器。调距桨控制器采集调距桨的实时参数(如轴转速、桨角等),根据遥控控制器的目标桨角指令,经过控制程序运算后,向调距桨控制装置发出桨角给定信号。通过 CAN 网向遥控控制器传送调距桨的运行状态。

(3) 安全保护系统。安全保护系统的主要作用是保护主机及重要设备在投入运行前及运行之中避免发生严重损伤设备的事故或将事故的危害减小至最低程度。安全保护系统的功能一般有:主机起动连锁;主机故障降速;主机故障停车。

安全保护控制器采集并监视危及主机安全的重要信号。在主机起动前,当有相关故障或状态存在时,它输出“起动连锁”信号禁止主机起动;在主机运行时,当出现相关故障信号时,根据故障的严重程度,向主机遥控系统发出“故障降速”信号或直接输出“故障停车”信号,迫使主机停机。

(4) 机旁操作板。机旁操作板用于轮机人员在机旁操纵主机。机旁操作板上一般设置应急车钟、简单的操作按钮、机旁/遥控转换接口和必要的指示仪表。随着技术的发展,

主机机旁操作板有向智能化发展的趋势,很多主机生产厂商为其生产的主机配套由计算机控制的功能齐全的主机机旁控制箱。

常规的机旁操作板上设置有:

- 1) 传令设备:应急车钟。
- 2) 机旁操作手柄或按钮:机旁/遥控转换开关、主机起动按钮、停车按钮、接脱排、手柄等。
- 3) 重要参数显示仪表:主机转速表、主机增压器转速表、主机淡水温度表、主机滑油温度表、主机滑油压力表、主机起动空气压力表等。
- 4) 故障指示灯:故障停车、主机超速等。

(5) 重要参数测量。尽管技术的发展已使船舶机舱控制监测系统功能齐全、性能优良、工作可靠性大大提高,但是由于船舶主推进装置的重要性,因此,一般还会在主推进装置控制监测系统以外,再配置一套重要参数测量装置。重要参数测量装置以最简单可靠的技术检测主机的少量重要参数,如主机转速、淡水温度及滑油压力等,以最直接方式在重要操作部位显示。目前随着电子技术、网络技术和计算机技术的不断提高,在船舶主推进装置控制监测系统以外,再配置重要参数测量装置的情况正日趋减少。

2 船舶主机遥控系统的基本控制功能

主机遥控系统的基本控制功能主要有起动、停车、转速调节、换向、机桨联动、负载程序控制、负载限制、安全保护、应急操纵、系统自检等。

2.1 主机起动停车

2.1.1 主机起动

柴油机由静止状态进入工作状态要有一定的条件,起动装置的任务就是创造这一条件。所谓柴油机起动就是由静止状态通过某种外部能源使其转动起来,使柴油机能完成进气、压缩、喷油直至发火燃烧的第一个工作冲程,最终发动机能依靠自己的做功而连续地运转起来。

主机遥控系统起动的主要功能,是实现按操作人员的遥控指令要求完成瞬间多变的正倒车连续起动。起动不可靠是柴油机工作不可靠的重要表现之一,是丧失机动性而使船舶发生种种事故的根源。好的起动控制不仅应能迅速可靠地起动主机,而且应有较小的机械磨损和较小的起动能源消耗和燃油消耗。

2.1.1.1 起动方式

柴油机遥控起动的方式,根据外力能源的不同,可分为电力起动和压缩空气起动等。不管采取哪种外力能源,目的都是使柴油机达到某一最低转速,在这个转速下柴油机气缸中具备发火燃烧的条件。柴油机起动所要求的最低转速叫做发火转速。

电力起动:由直流电动机和蓄电池等组成起动装置,通过齿轮啮合机构带动曲轴旋转起动柴油机。这种起动装置具有结构紧凑、操作方便等优点。多用于高速柴油机或船舶救生艇发动机的起动。

压缩空气起动:将压力为 3.0MPa 的压缩空气按柴油机的发火次序依次送入各缸,推动活塞使曲轴转动实现柴油机的起动。压缩空气起动装置的优点是具有较大的起动转矩,起动迅速可靠,能连续多次起动。同时便于船舶主机在紧急换向时进行紧急刹车和迅速进入反转,也便于实现遥控操纵。缺点是必须具有一套压缩空气设备,结构较复杂,而且起动系统的气密性要求也较高,如有泄漏将影响起动的可靠

性；同时起动设备中的阀件容易出现故障影响起动；起动时压缩空气在气缸中膨胀温降，产生的凝水使气缸腐蚀磨损增大（特别是冷车起动）。因此，它适用气缸直径较大（通常大于150mm）的柴油机起动。船用大、中型柴油机，特别是可直接反转的船用主机和大型船舶副机，几乎无一例外地采用压缩空气起动。

2.1.1.2 遥控起动条件

为了保证安全可靠地遥控柴油机起动，起动系统（压缩空气起动）必须具备以下几个条件：

（1）柴油机机旁控制功能正常。在遥控起动主机之前，主机本身及机旁控制功能是正常的，且主机应处于遥控状态。

（2）起动空气必须具有足够的压力。起动空气具有足够的压力才能使柴油机在较短的时间内达到发火转速。空气瓶中的空气压力一般应大于3MPa。对柴油机来讲，一般要求最低起动空气压力在1MPa以上。

（3）超保机构功能正常。在遥控起动主机之前，应确保紧急停车按钮动作、指令传递及超保电磁阀功能的有效性，超保气瓶必须具有足够的压力。

（4）必须没有起动联锁信号。为了保证主机起动的安全性，安全保护装置会对一些不安全因素进行起动联锁，如主机的排气挡板状态、盘车机状态、轴系刹车状态、艉轴密封圈状态、预供滑油压力和冷却水温等等。

根据主机型号的不同，动力装置配置情况的不同，要求的联锁信号有差异。

2.1.1.3 慢转起动

有些机型的主机在长时间停车后再次起动时，要求先使主机缓慢转动1~2转的起动工序称为慢转起动。当主机停车时间超过规定时间（通常为30min），应该慢转起动主机。在这种情况下，遥控系统将先打开慢转阀（或限制主起动阀开度），使主机进入慢转状态，待转满规定的圈数（1~2圈）时，自动结束慢转起动并打开主起动阀（或使主起动阀开足），进入正常的起动程序。在应急操纵时，控制系统可以不经过慢转程序，直接进入正常起动程序。

慢转起动的作用：①“布油”润滑，减轻主机的磨损；②慢转起动还具有“试起动”的功能，即检查主机的转动情况。当主机因种种原因而不能转动或转动困难时，它将自动结束慢转起动，禁止正常起动并发出报警，从而保证主机在起动过程中的安全，以避免类似喷油器泄露或缸盖漏水等情况引起爆燃、水击现象以及主机与轴系因外物阻碍运转的可能后果。

2.1.1.4 起动油门

遥控起动主机时，除了依靠外力能源使主机转速达到发火转速外，控制系统还必须供给适当的燃油量，才能使主机进入燃烧做功阶段。对于不同的机型，燃油量的供给时间是不一样的，有的机型要求先进气再供油，而有的机型要求油气并进。控制系统应能适应对象的控制要求。

主机遥控系统是通过主机转速信号来控制调速器供油的。调速器则是根据给定转速和实际转速的偏差来调节供油量的。主机刚进入起动阶段时，实际转速与给定转速的偏差很大，导致调速器的输出很大，也就是起动供油量很大，容易出现爆燃现象。由于主机在刚起动时，气缸温度较低，燃烧条件较差，爆燃对主机的损害较大，因此必须对主机的最大起动供油量进行限制。在电子调速系统中，控制系统可以直接设置起动油门来限制主机起动供油量。在采用机械/液压式调速器的调速系统中，主机一般带有起动油门限制

机构。

2.1.1.5 起动失败与重起动

主机遥控起动失败分为两种：起动时间过长与起动失败。

（1）起动时间过长。起动时间一般是指主起动阀打开，到主机转速达到发火转速的时间，一般为5~15s，控制系统之所以要对起动时间进行限制，是为了防止由于机械故障或起动空气系统等故障，主机一直达不到发火转速，造成耗气太多，影响主机再次起动。当主机起动时间过长时，控制系统会关闭主起动阀，打开停车阀，自动终止起动程序，同时发出报警信号。起动时间过长报警后需要停车复位才能重新起动主机。

（2）三次自动重复起动与重起动。在外力作用下，主机转速达到发火转速后，控制系统在供油的同时，将关闭主起动阀，切断高压空气供给。如果此后主机转速因发火不良而重新降至发火转速以下，控制系统即认为此次起动失败。

对于因发火不良而造成的起动失败，控制系统将自动连续重复起动三次。为了保证三次起动成功，控制系统将在第三次起动主机时，实施重起动功能。控制系统将提高发火转速和起动转速从而加大起动供气量和供油量。

在实施三次重复起动时，控制系统会发出“一次起动失败”、“二次起动失败”和“三次起动失败”报警信号。三次起动失败后，若要重新起动主机，需要停机复位后，才可重新发出起动指令。

2.1.1.6 应急起动

应急起动指紧急状态下需要快速起动主机的状况，这时控制系统应在“应急操纵”状态。此时起动主机，控制系统会自动加大供气供油量，越过慢转控制程序和部分起动连锁的信号，紧急起动主机。“应急操纵”往往是为了保证船舶航行的安全，而牺牲了部分对主机的保护功能。

2.1.1.7 起动成功转速

主机遥控系统一般设置某一转速值，当主机起动后转速达到并超过该值时，遥控系统认为主机起动成功。该转速值称为起动成功转速，一般起动成功转速大于主机最低稳定转速。

2.1.2 主机停车

停车是指通过一定的机构使柴油机停止转动，通常有三种主机的停车方式。一般主机通常具有一种以上的停车方式。主机遥控系统的停车通常是控制系统接收到停车操作指令后，发出停车信号，通过执行机构（停车电磁阀、停车气缸等）动作使主机停车。

（1）调节油量停车。调节油量停车是通过伺服机构（如停车气缸）带动主机的燃油杆，使主机的供油量减小到零，柴油机降速或停车。该机构停车动作阻力大，对伺服机构的工作能力要求高，需防止它与操纵机构产生互相干涉现象。

（2）燃油倒吸停车。燃油倒吸停车是通过吸引继电器控制的停车阀来改变燃油流向而停止供油的。它仅能实现停车而不能降速。这种停车方式动作轻便迅速，通常用于紧急停车，不存在干涉问题。

（3）停气停车。停气停车是通过进气阻气门截断进气来停车，但不能作降速用。该机构阻气门动作轻便，伺服机构也简单，与操纵结构也无干涉。

2.1.2.1 正常停车

正常停车指根据操作人员的正常停车指令而实施的主机停车功能。正常停车通常是通过车钟系统或停车按钮发出。控制系统接收到停车指令后，将对停车指令的安全性进行分

析。通常只有在安全转速以下，或主机已经处于空车状态时，控制系统才会执行正常停车控制程序。控制系统将减小给定转速至零，同时接通停车电磁阀，使燃油杆位置为零，主机停车。

2.1.2.2 应急停车

应急停车指根据操作人员紧急停车指令，或主机出现严重故障时实施的主机停车功能。应急停车有人工应急停车（紧急停车）和自动应急停车（故障停车）两种。

（1）人工应急停车（紧急停车）。当船舶或主机运行出现紧急情况时，操作人员按下“紧急停车”按钮，可使主机立即停机。通常在驾驶台、集控台和机旁均独立设置“紧急停车”按钮，并以醒目颜色指示。按钮上还应设有防止误操作的防护措施，如加上防护罩等，“紧急停车”按钮应直接接至紧急停车电磁阀，保证紧急停车指令无条件快速执行。

（2）自动应急停车（故障停车）。当主机遥控系统、安全保护系统检测到有主机超速、主机滑油失电压，齿轮箱滑油失电压等严重故障时（主机型号、动力装置配置不同，故障停车信号类型数量有差异），控制系统自动发出“故障停车”信号，驱动紧急停车电磁阀动作。

紧急停车电磁阀通常单独设置独立的电源和气源。一旦动作后，无论主机运行状态如何，立即断油且实施燃油倒吸，迫使主机停车。同时控制程序发出声光报警。此后若要重新启动主机，需进行人工复位。

2.2 主机转速调节

2.2.1 转速调节

柴油机的不同转速是通过改变每一循环的喷油量来获得的。在一定的外界负载条件下，若供给柴油机以一定的燃油量，使柴油机功率与外界负载相平衡，柴油机就在某一转速下稳定运转。

船舶主机在实际使用中，外界负载总是经常的变化的。当外界负载变化时，原来处于平衡状态的柴油机就会出现不平衡。为了使柴油机的功率与新的负载适应，必须及时改变喷油量，而喷油量的改变则是通过特设的自动调节装置—转速调节器（调速器）来完成。主机遥控系统的转速调节就是通过控制程序控制转速调节器来实现对主机转速的控制。根据调速系统的配置方式不同，主机遥控系统的转速控制方式也不同。

2.2.1.1 船用主机的转速调节特性

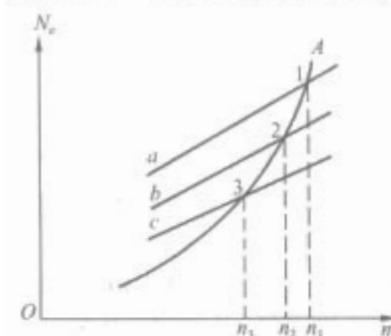


图 7.2-5 船用主机自动调节转速示意图

作为直接带动螺旋桨运转的船用主机，因为船舶航速的改变而需要经常的改变其转速。这种调速都是通过直接操纵油量调节机构来实现的，从图 7.2-5 可以看出，假若船舶原先在某一状态下航行，螺旋桨的特性曲线 A 与主机的部分负载特性曲线 b（全负载特性曲线也一样）的交点 2，即是当时主机稳定运转点。此时转速为 n_2 ，主机发出的功率与螺旋桨吸收的功率刚好平衡。在外界负载不变的情况下，若为了增加航速而要增加主机转速，则只要增加每循环供油量即可。这时主机按部分负载特性曲线 a 工作，由于主机在转速 n_2 下发出的功率大于螺旋桨吸收的功率，因此柴油机就加速，直到转速增加到 n_1 ，两者功率达到新的平衡，转速才不再增大。点 1 就是主机增速后的稳定运转点。同理，

若为了降低航速而要降低主机的转速，只要减少每循环的供油量即可。这时主机按部分负载速度特性曲线 c 工作。由于螺旋桨所需要的功率大于主机发出的功率，因此转速下降，在较低的转速 n_3 下两者功率又相等。点 3 就是主机减速后的稳定运转点。

同样在供油量不变的情况下，若由于外负载的变更，主机也具有自动调节转速的作用。这可从图 7.2-6 中看出。若主机原来在点 1 稳定运转，此时的转速为 n_1 ，当由于某种原因外负载增加而使螺旋桨负载系数由 K 变为 K_1 （使推进曲线变陡）时，在油门位置不变的情况下，主机的工作点将由点 1 移到点 2，转速将自动由 n_1 下降到 n_2 。当上述外在原因消失，螺旋桨负载系数又恢复到 K，推进曲线又恢复原状。此时主机发出的功率大于螺旋桨所需的功率，于是主机就自动加速，直到转速回到 n_1 ，又因为功率平衡而恢复原来的稳定状态。同样，由于外负载减少而使螺旋桨负载系数由 K 变为 K_2 时，主机的工作点将由点 1 移到点 3，转速将自动由 n_1 增加到 n_3 。当外在原因消失，螺旋桨负载系数又恢复到 K。此时主机发出的功率小于螺旋桨所需的功率，于是主机就自动减速，直到转速回到 n_1 ，又恢复原来的稳定状态。由此可见，船用主机具有自动调节转速的性能。

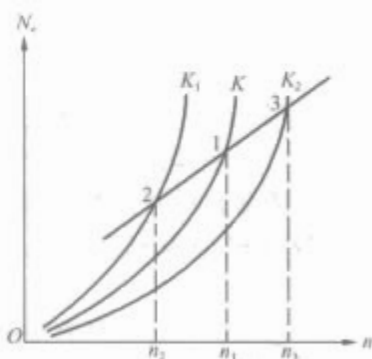


图 7.2-6 外负载对主机转速的影响

同样在供油量不变的情况下，若由于外负载的变更，主机也具有自动调节转速的作用。这可从图 7.2-6 中看出。若主机原来在点 1 稳定运转，此时的转速为 n_1 ，当由于某种原因外负载增加而使螺旋桨负载系数由 K 变为 K_1 （使推进曲线变陡）时，在油门位置不变的情况下，主机的工作点将由点 1 移到点 2，转速将自动由 n_1 下降到 n_2 。当上述外在原因消失，螺旋桨负载系数又恢复到 K，推进曲线又恢复原状。此时主机发出的功率大于螺旋桨所需的功率，于是主机就自动加速，直到转速回到 n_1 ，又因为功率平衡而恢复原来的稳定状态。同样，由于外负载减少而使螺旋桨负载系数由 K 变为 K_2 时，主机的工作点将由点 1 移到点 3，转速将自动由 n_1 增加到 n_3 。当外在原因消失，螺旋桨负载系数又恢复到 K。此时主机发出的功率小于螺旋桨所需的功率，于是主机就自动减速，直到转速回到 n_1 ，又恢复原来的稳定状态。由此可见，船用主机具有自动调节转速的性能。

2.2.1.2 调速器

虽然船舶主机具有自动调节转速的性能，但是现代船舶为适应各种复杂的作业工况，为保护柴油主机安全可靠地运行，延长其使用寿命，均为主机配置了全制式调速器。全制式调速器能使主机在最低稳定转速到最高转速之间的任何一个给定转速下，根据外负载的变化而自动调节喷油量，保持主机的转速稳定。为了实现机舱自动化，全制式调速器还设有远距离遥控接口。

20 世纪 80 年代以前，船舶调速系统多采用机械/液压式调速器。90 年代以后，随着电子技术的发展，船用电子调速技术得到了广泛应用。电子调速装置可以是独立的装置，也可以由遥控系统包含其电控部分。现在的主机遥控系统大多包含了转速调节控制功能。

（1）不带电调的遥控系统转速控制。对于采用机械/液压式调速器或独立电子调速器的系统，主机遥控系统根据车令要求和主机运行状况，通过输出给定转速来控制主机运转，由机械/液压式调速器根据负载变化情况调节供油量，保持主机转速稳定。在这种系统中，主机遥控系统只能控制主机的转速，而不能直接控制主机供油量。

（2）带电调的遥控系统转速控制。对于遥控系统具有主机转速调节功能，主机配备调速执行机构的系统，主机遥控系统根据车令要求、主机运行状况及实际转速，经过调节运算（通常为 PID）输出燃油杆位置信号，由执行机构驱动燃油杆，达到保持主机转速稳定的目的。在这种系统中，主机遥控系统能直接控制主机供油量。

2.2.2 临界转速控制

船舶主机运行时，可能会在某一转速区间内与船体结构产生共振，这个转速区间称为临界转速。如果主机长时间工作在临界转速区，将对船体和主机本身造成损伤。因此主机

标定转速。当柴油机在低于 n_H 的某一转速的某一转速下运转时,需要减小每循环供油量(减小油门格数),相应于这个供油量的部分负载特性曲线 2。这时柴油机的功率不仅小于 N_{eH} ,而且小于这个转速下由全负载速度特性曲线 1 所限定的功率。在转速从 n_H 到 n_{min} 的全部变化范围内,柴油机的功率都不会超出允许的范围。在运转中还允许在高于 n_H 的 n_{max} 下工作。这时需要增加供油量,相应于这个供油量的超负载特性曲线 3 与螺旋桨特性曲线相交于 c 点。这时柴油机处于超负载运行状态,因此只允许柴油机短时间在这个转速下工作。螺旋桨与柴油机采取这样的配合在一定的条件下能满足以上提出的要求。

图 7.2-10 给出了螺旋桨与柴油机的三种不同配合情况。图中曲线 I、II、III 表示三种具有不同螺距比的螺旋桨特性曲线。曲线 1 为柴油机的全负载速度特性。第一种螺旋桨具有螺距比 $(H/D)_1$,其特性曲线 I 与柴油机的全负载特性曲线 1 相交于 a 点。在这个配合点上柴油机的转速即为 n_H ,功率为 N_{eH} 。这种螺旋桨与柴油机的配合,是符合要求的。曲线 II 具有比曲线 I 大的螺距比,曲线 III 具有比曲线 I 小的螺距比,这两种曲线在转速 n_{min} 至 n_{max} 的范围内与主机的负载速度特性曲线配合是不合适的。

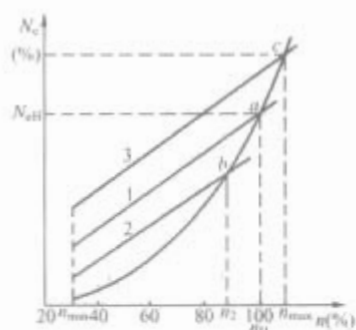


图 7.2-9 柴油机速度特性与螺旋桨特性的配合

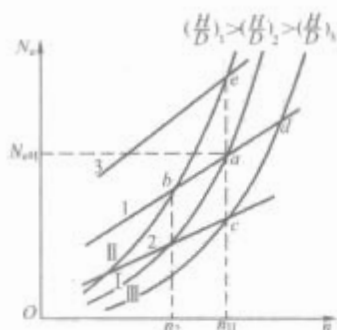


图 7.2-10 具有不同螺距比的螺旋桨与柴油机的配合

柴油主机和螺旋桨的配合是由船舶设计人员经过计算和试验确定的。对于定距桨船舶,柴油机和螺旋桨的配合关系已经固化,对主机遥控系统来讲不存在机桨联动的问题。对于采用可调螺距螺旋桨的船舶,设计人员往往计算出适合于各种工况下的机桨最佳配合参数,由主机遥控系统在控制中实现。

控制系统事先将机桨最佳配合点参数或机桨联动曲线存储于系统中。当控制系统投入运行时,系统会根据车令要求,寻出目标工作点的机桨最佳配合参数,然后分别控制主机和调距桨到达要求的状态。主机遥控系统不仅控制机桨在稳态时达到最佳配合工作点,而且在动态过程或某些特殊过程,如限制、保护过程中也注意机桨配合与联动。

以上分析的是柴油机与螺旋桨配合的一般原则。由船舶设计人员确定的机桨最佳配合参数是理论值,在实际运行中还需考虑各种状态条件下,可能引起特性变化的因素,如船体污底、海面风浪、航区变化等。因此一些智能化程度较高的主机遥控系统,除了将理论计算值作为基础外,还可以按最佳目标,根据实际情况变化,自动修正最佳配合点参数。

2.5 负载程序控制

船舶主机在遥控系统的控制下,从空载逐渐加载至额定负载或从额定负载减载至空车状态的过程称为负载程序控制。之所以要对主机实施负载程序控制,是因为主机的热状态需要逐步稳定的过程。快速粗暴的负载加减过程都会对主

机造成损伤,尤其在冷机状态下和主机高负载状态下,负载的增加更要严格按照负载程序控制。

一般主机厂家都会给出主机的负载程序曲线。大部分主机的负载程序曲线分为正常热机加减速曲线,正常冷机加减速曲线和应急冷热机加减速曲线。

无论操作人员如何大幅度快速操纵车令手柄,控制系统都根据车令要求及主机运行状态,选择适当的负载程序曲线,执行负载程序控制,按负载程序曲线规定的速率逐步加载,保证主机安全可靠地运转。

对于采用可调螺距螺旋桨的船舶主推进装置,主机负载的增减是通过转速与桨角的联动实现的,因此控制系统的负载程序控制应该同时控制主机的转速和螺旋桨桨角,而不仅仅是其中一个参数。

2.6 负载限制

主机转速控制不能只考虑给定目标,还须兼顾其控制效果。因为,在大幅度操纵主机或变工况的情况下,如只考虑其控制目标就可能在动态过程中使主机短时超负载。因此,为了保障主机的运行安全,控制中一旦触及负载限制曲线,控制程序必须放弃某些控制指标,进行负载限制。

负载限制的类型及控制方法如下:

- 1) 螺旋桨特性限制:根据调距桨桨角,按照负载限制曲线,限定最大供油量。
- 2) 扭矩限制:根据主机转速,按照扭矩限制曲线,限定最大供油量。
- 3) 增压空气压力限制:根据增压空气压力,按照冒烟限制曲线,限定最大供油量。
- 4) 最大负载限制:限定最大供油量。
- 5) 负载控制:根据车令给定信号而不是转速偏差,确定主机供油量,此控制方法适用于大风浪海况。

图 7.2-11 是一个典型的负载控制原理框图。

车钟发出的设定信号 I_r 首先送到加速负载程序限制环节,实现加速度限制与热负载程序限制,使车令设定转速按预先给定的变化规律变化,避免主机在加速过程中出现的加速过快及高负载时出现的热负载波动过大。然后,将其送到临界转速自动避让环节与最小、最大转速限制环节,以保证主机不在临界转速区域内运行,并在设定转速低于最低稳定转速时,将其限制在最低稳定转速上,而在设定转速大于最大允许转速时将其限制在最大转速上。

通过上述各环节限制后的设定信号 n_g 被引到调速部分的比较环节,由转速检测环节检测到主机实际转速 n_r 也被引到比较环节,比较环节将 n_g 与 n_r 比较后,所得偏差按 PID 调节规律运算,再经负载限制环节及执行环节去控制主机的油门开度,将主机转速调节到设定转速上。

在调速过程中,若调节规律运算环节输出的控制量大于增压空气压力限制环节给出的最大允许供油量,或者大于扭矩限制环节给出的最大允许供油量,或者大于最大负载值,控制系统将选择其中最小的一个作为输出,以限制主机的供油量。在这种情况下,调速系统的快速性与准确性指标有所下降,但主机的运行安全有了保障。在一些电子调速器中,为了能使调速特性逼近螺旋桨理想推进特性,通常在 PID 调节规律运算后增加一个螺旋桨特性限制环节,或者采用非线性变增益运算环节。

上述转速控制是以设定转速与实际转速间的偏差转速作为控制依据,因此,当船舶遇到大风浪纵向摇摆厉害时,螺旋桨吃水变化加大。调速系统为了维持主机的转速恒定,使

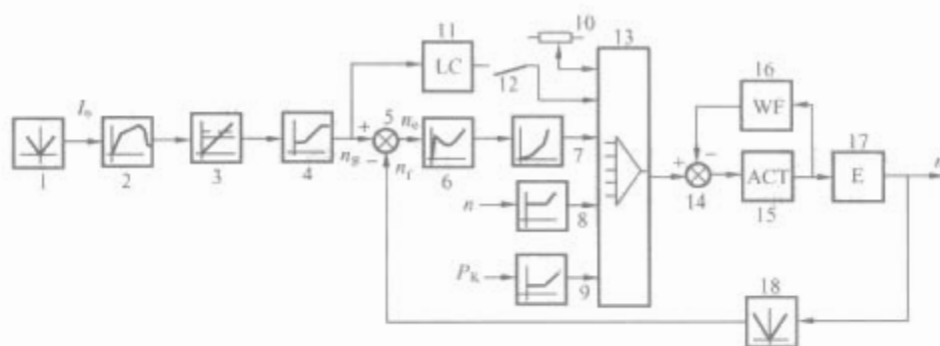


图 7.2-11 主机的转速与负载控制原理框图

1—车令；2—加速负载程序限制；3—临界转速自动避让；4—最小、最大转速限制；5—转速比较；6—PID 调节规律运算；7—螺旋桨特性限制；8—转矩限制；9—增压空气压力限制；10—最大负载限制；11—负载控制器；12—负载控制切换开关；13—选小器；14—油门位置比较；15—执行器；16—位置反馈；17—主机；18—转速检测反馈

主机的负载变化有可能超出主机所能承受的范围，从而危害了主机的运行安全。这时可接通负载控制切换开关，使主机的控制方式转换为负载控制方式。在负载控制方式中，主机的供油量仅与车令信号有关，而与主机的实际转速无关。因此，在设定信号不变时，主机的供油量不变。但此时主机的转速无法恒定，它会随着螺旋桨的吃水变化而变化。当螺旋桨产生的阻力矩大于柴油机气缸燃气所产生的驱动力矩时，动量平衡关系破坏，主机转速下降，以满足新的动量平衡关系。反之，主机转速就会升高。可见，负载控制是以放弃转速控制指标来换得主机的运行安全的。

主机负载限制功能以保障主机安全为目的。然而，当船舶遇到危险时，“应急操纵”应能取消负载限制，实现“舍机保船”的紧急操作。

2.7 安全保护

在主机遥控系统中，安全保护功能的主要作用是禁止主机在不安全状态下起动及监视主机运行中的重要工况参数，根据危险程度的不同使主机自动减速或自动停车。

2.7.1 起动安全保护

起动安全保护主要有起动联锁、起动油量限制、起动时间过长保护及重起动保护。这几种保护在上述起动功能的叙述中已有详细的介绍。

2.7.2 换向安全保护

换向安全保护的主要目的是确保主机在换向过程中不超负载并安全运行。特别是在紧急情况下，如操作人员根据需要快速将车钟由前进五扳至后退三，船舶将紧急换向。

对于可逆转柴油机，控制系统通常先使主机停车，在主机转速下降到一定的安全数值（可进行现场设定）后，再进行反向起动。

对于不可逆转柴油机，若是带离合器齿轮箱，则在主机转速下降到一定的安全数值后脱排，然后再反向接排，不允许在主机高速时直接脱排。

对于不可逆转柴油机，若是带调距桨，则根据机桨匹配曲线，分别控制主机转速和调距桨桨角，按一定规律减负载，再反向加负载。

2.7.3 运行安全保护

(1) 超速的安全保护。对于主机转速超过额定转速的一定百分比（10%~15%），要立即使主机停车。通常主机遥控系统设有独立的超速保护安全装置，一旦检测到主机转速超过设定值，超速保护立即动作，驱动停车机构，使主机断油停车。有些主机上还带有机件的超速保护安全装置。超速保护动作后，要进行机械复位。应先确认主机的车令在停车

位置，再进行超速保护的复位。

(2) 故障降速。当出现主机滑油高温或低压、冷却水高温或低压、排气温度高或均差过大、扫气箱着火等现象时（不同主机要求的信号不同），则遥控系统发出自动降速信号，使主机减速运行。在主机故障降速运行后，如越限参数仍进一步恶化，一旦超越自动停车整定值，安全保护系统将使主机停车。在主机故障降速运行后，若越限参数恢复正常，一般也需操作人员手动确认后，遥控系统才取消故障降速，使主机转速回到给定值。

(3) 应急停车保护。当出现主机滑油过低压（或断流）、冷却水失电压、主机超速、曲轴箱油雾浓度过高等严重故障时（不同主机要求的信号不同），安全保护系统将直接控制主机自动停车，从而确保主机的安全运行，使主机免遭损坏。

在发生主机自动停车时，机舱人员必须下机舱排除故障，在故障排除后需重新运行前，首先必须保证车钟手柄已拉回停车位置。有的船舶在故障自动停车时，调速器被锁定，在这种情况下，必须复位调速器，否则主机无法重新运行。

当正常停车失灵时，可通过“应急停车”按钮，手动控制切断供油，迫使主机停车，以确保船舶运行安全。

2.8 应急操纵

在船舶出现紧急情况时，有时需要快速起动主机或不允许出现自动降速及停车，这时可按下“越控”（有时称应急操纵）按钮，遥控系统将取消部分起动联锁限制或暂时撤消故障降速及停车的控制，迫使主机带病运行，以实现“舍机保船”的目的。

2.8.1 起动联锁的越控

按下“越控”按钮，控制系统及安全保护系统将取消部分起动联锁的限制。主机可以在冷机或起动条件欠缺的状态下快速起动。但是对于主机不安全的因素，特别是有外力阻碍主机运转时，起动联锁信号仍然有效。

2.8.2 故障降速的越控

按下“越控”按钮，将取消故障降速的限制，主机恢复至原来的转速运行。即使故障还在，也只是声光报警，提醒机舱人员注意，赶紧排除故障。

2.8.3 应急停车的越控

按下“越控”按钮，将取消部分自动应急停车的保护，主机不停车，仍然正常运转。但须注意，有些应急停车信号不能被越控，如主机超速、主机滑油失电压等故障，即使按下了“越控”按钮，当这些故障发生时，主机仍然自动停车。

必须排除故障并复位后,主机才能重新运行。这主要是为了避免主机受到极大损害。

2.8.4 增减速率的越控

按下“越控”按钮,遥控系统将执行应急负载程序控制,使主机转速或负载能较快增加或降低,以确保船舶的应急机动航行。

2.9 系统报警及自检

遥控系统通常设有系统报警和自检功能。系统报警和自检是为了提醒值班人员检查系统是否正常工作。

2.9.1 系统报警

遥控系统通常设有声光报警。一旦出现报警,相应的灯会闪烁,并且发出声音报警。对于重要信号的报警,还应延伸到机舱、驾驶室、公共舱室及轮机长房间。在值班人员消音消闪后,相应的报警灯会变平光。直到故障排除,相应的报警指示灯才熄灭。

2.9.2 系统自检

系统自检一般有两种情况。①刚上电时,控制系统将对其本身作全面的初始化和自检,系统确认自身正常才会投入运行,否则系统将报警;②运行过程中,控制系统仍经常对自身的部分功能进行自检。一旦发现故障,特别是重要参数测量、信号输出、内部通信等严重故障时,控制系统一般会锁定状态或将动力装置导入安全状态,并发出声光报警。

2.9.3 对外数据交换

现在的主机遥控系统大多具有与船舶系统或其他控制系统的数据交换功能,一般采用通信的方式。早期的遥控系统制造商大多采用自己的通信协议和方式;近年来随着现场总线技术的发展,遥控系统大多采用现场总线的方式,如 CAN、Lonworks、Profibus、Modbus 等通信方式。遥控系统通过对外数据交换接口,既可以向船舶系统提供动力装置的运行参数、设备工作状态信息,也可以从其他控制系统获得相关信息,如计程仪的航速信息,推力扭力仪的轴系功率、扭力信息等。主机遥控系统的对外数据交换功能使其易于融入全船信息管理系统。

3 船舶主机遥控系统的常用部件

3.1 车令发讯器

3.1.1 概述

车令发讯器在船舶上也称为车钟或传令钟,是船舶主机遥控命令的发送、接受传令器。当驾驶室的驾控操纵人员推动车令发讯器的手柄时,命令就传达到机舱集控室控制台上的车钟,这个车钟的传令指针随即转动指向新的控制指令的挡位。在集控室值班的轮机员得到命令后推动集控台上的车令回令器,使控制手柄和驾驶室来的命令相一致。此时,在驾驶室的车钟其回令指针随着集控室轮机员的回令也转动指向新的控制命令的位置,然后,轮机员在集控台上推动操纵器以操纵主机推进系统。也有的船舶将集控室的回令器设在机旁控制台(或机旁控制箱上),轮机员接到驾驶室的命令后,在机旁控制台(箱)上推动操纵器以操纵主机,或回令后直接操纵主机。如果是复合车令发讯器(即车令发讯器和操纵器设计在一起的称之为复合车令发讯器),则车令发讯器经操作后一方面将回令发送出去,同时将控制主机运行的信号同时传送给主机控制单元,由控制单元控制主机调速执行机构,以控制主机的运行。

3.1.2 车令发讯器的基本结构

车令发讯器有各种各样的结构形式。但不外乎由以下几部分组成:①发讯手柄及其机械结构;②接收微机电及指针或显示电路及指示灯;③显示面板;④发令电路及接受电路。车令发讯器如图 7.2-12 所示。

如果是复合车令发讯器,其电路的功能既有输出车令信号,又有输出能够控制主机运转的信号。有些双主机的船舶将两个车令发讯器设计在一起,如图 7.2-13 所示。

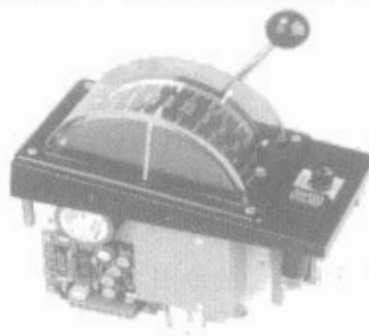


图 7.2-12 通用车令发讯器

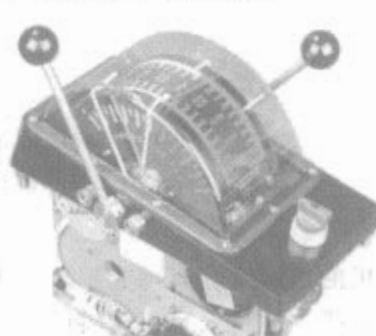


图 7.2-13 复合车令发讯器

3.1.3 车令发讯器几种典型的形式

3.1.3.1 通用车令发讯器

早期的船舶都有一个通用车令发讯器(如图 7.2-12 所示)。

图 7.2-14 是一个车令发讯器的原理图。只含有一个发送器和一个接收器,还必须配有一个发出音响的装置。装于驾驶室和集控室的音响装置,一般都是低分贝的鸣音器或喇叭。而装于机舱的是高达 110dB 的音响发音器,使得在主机运转轰鸣声中的机舱也能使人听得清楚。图中, F 为发送器; J 为接收器。发送器有一个操作手柄,推动手柄将指令发送出去。接收器有一个放大器和微型伺服电动机,信号由放大器放大后由电动机带动指针随着对方发讯器操作手柄而转动一定的角度。同时将信号通过电路传达到继电器,由继电器带动声响设备发出声响。如果在驾驶室发出指令后,在集控室或机旁控制台不回令,则声响装置一直响下去直到回令。



图 7.2-14 车令发讯器的原理图

3.1.3.2 应急车钟

每一艘船舶上除了主车令发讯器外都另外设有一套应急车钟,或叫应急车令发讯器。应急车钟用独立的应急电源供电。当主车令发讯器或主机遥控装置发生故障或失电后就启动应急车钟进行传令。当驾驶室用应急车钟传令给机舱后,机舱值班人员用应急车钟回令后用手直接操纵主机运行。应急车钟都是设计成用灯光显示传令,其操纵手柄的轴上连接一多挡转换开关。当发令一方将手柄推到新的挡位,则双方的新挡位上的灯光都产生闪光,同时鸣音器发出声响,而原来的挡位保持平光。当另一方将手柄也推到同一新挡位时,则双方新挡位上的灯光由闪光变为平光,而原来挡位的灯光均熄灭,同时音响消失。如图 7.2-15 是一种应急车钟,图 7.2-16 为应急车钟的原理图。

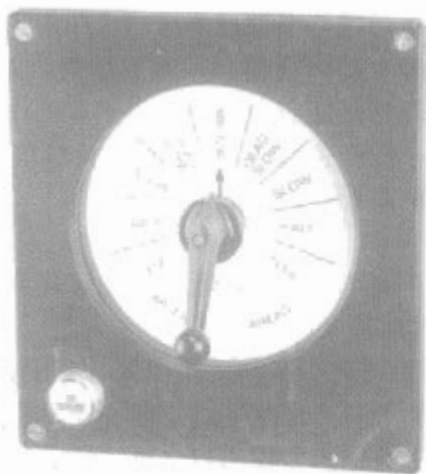


图 7.2-15 应急车钟

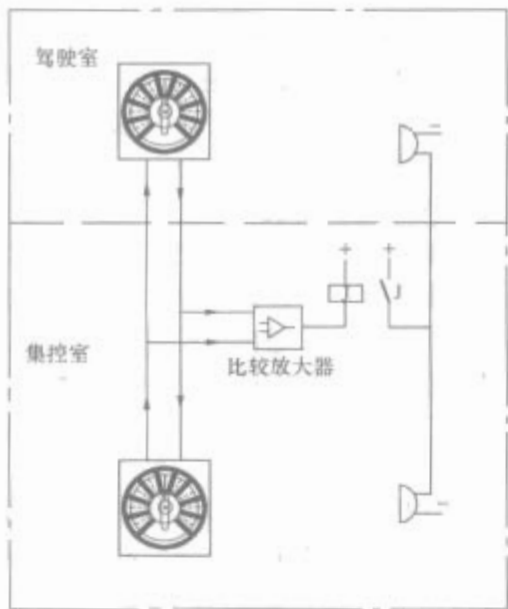


图 7.2-16 应急车钟的原理图

3.1.3.3 复合车令发讯器

随着科学技术的发展和生产实际的需要，有些船舶（比如无人机舱，少人值班机舱的船舶）的车令发讯器和操纵器两者合二为一，称为复合车令发讯器或叫复合车钟。如复合车令发讯器装在驾驶室，当驾驶室传令给集控室及机舱的同时，操纵主机的信号也能传到控制单元（目前最常用的控制单元是单片机和可编程控制器），由控制单元自动地控制主机运行。如果在集控室和机舱设少量值班人员，则值班人员只要在集控室或机旁控制箱监视主机运行情况。如果复合车令发讯器仅装于集控台或机旁控制台（箱）上，则机舱值班人员在操纵复合车令发讯器回令地同时，操纵主机的新控制信号也传递到了控制单元，由控制单元自动控制主机的运行，达到又回令，又控制主机运行的目的。这种情况下，驾驶室只需装一个纯车令发讯器就可以了。图 7.2-17 和图 7.2-18 是两种不同形式的复合车令发讯器。

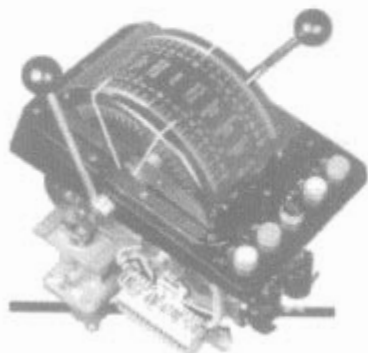


图 7.2-17 双轴复合车令发讯器

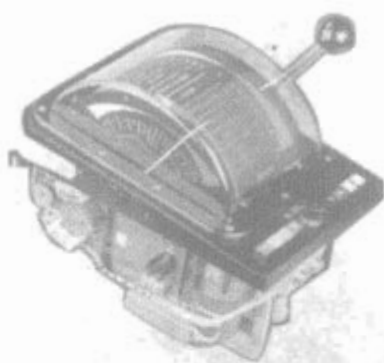


图 7.2-18 单轴复合车令发讯器

3.1.3.4 主机操纵器

主机操纵器既可以独立设立单一的个体，也可和发讯器合二为一，两者的样子往往做得差不多。它的主要作用是将相当于车令的信号传送到控制主机的单元，以控制主机运行。图 7.2-19、图 7.2-20 和图 7.2-21 是几种基本形式。

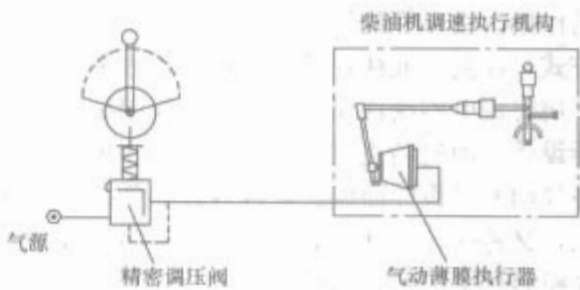


图 7.2-19 气动主机操纵器框图

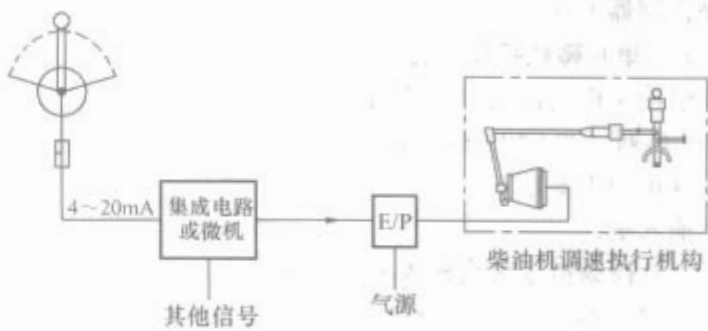


图 7.2-20 电气转换主机操纵器框图

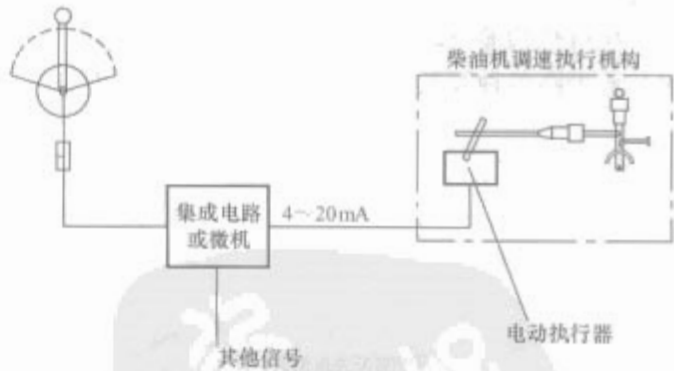


图 7.2-21 电动主机操纵器框图

图 7.2-19 的原理是当推动操纵器的手柄时，连着手柄转动的一个顶住精密调压阀的凸轮做上下直线运动，使得精密调压阀在不同挡转速时有不同的输出气压。此气压直接送到气动薄膜执行器，以带动柴油机油门及调速器。图 7.2-20 的原理是操纵器手柄被推动时，其内部的集成电路产生一个电信号（如 4~20mA 或 0~10V）输送到微机，由微机综合其他信号后，去控制 E/P，由 E/P 将电信号转换成气压信号，通过气动薄膜执行器来控制柴油机的运行。图 7.2-21 是由微机的电信号去直接控制电动执行机构（或电动调速器）来控制柴油机的运行。图 7.2-22 是一种主机操纵器。

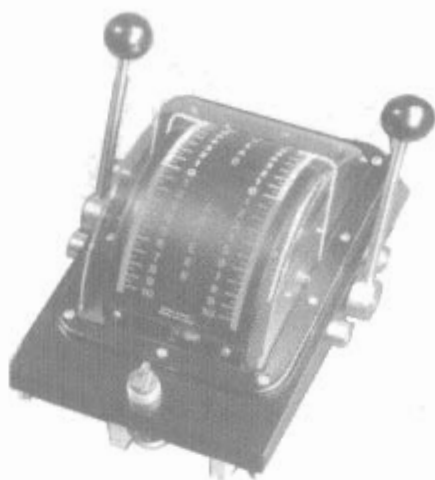


图 7.2-22 主机操纵器

3.2 控制单元

在船舶主机遥控系统中，控制单元十分重要，往往起到关键性的作用。在早期的遥控系统中，很多是电、气混合式的控制方式，控制单元往往是用继电器组成的逻辑电路，后来发展了用集成电路硬件设计，再后来是用单片机和可编程序控制器设计。而气动主机遥控的逻辑控制单元是根据需要采用各种气动元件设计而成。这种方式的气控阀件既是逻辑控制单元，又是执行元件。此节主要介绍的内容是单片机和可编程序控制器组成的控制单元。

单片机和可编程序控制器的基本原理在其他篇中已专门详细介绍。这里仅简介一些在主机遥控中选用单片机和可编程序控制器的要求。

3.2.1 单片微机控制单元

船用主机遥控用单片机目前选用 16 位 CPU 为适宜，如 80198 系列。和 CPU 相配的各种芯片元件组成的控制单元必须满足如下要求：

输入量：

- (1) 操纵指令隔离输入模拟量两路（一般为 4~20mA，0~5V DC 或者 0~10V DC）。
- (2) 主机转速反馈隔离输入二路（计数输入，频率可高达 10kHz）。
- (3) 执行机构输出轴位置模拟量或开关量一路。
- (4) 若干路各种开关量输入（包括紧急停车指令，正常

停车指令，主机超速，滑油过低压，冷却水高温等自动停车信号，各种故障自动降速信号，越控信号，起动联锁信号，若主机带有齿轮箱则还应有齿轮箱正倒车工作油压，齿轮箱滑油低压信号，控制位置等），这些开关量信号是根据每种船舶实际不同的需要而设置的。

输出量：

- (1) 正车、倒车、停车、紧急停车等开关量隔离输出约 5~10 路（根据船舶实际需要定）。
- (2) 供执行机构使用的隔离模拟量，输出控制信号 1 路。
- (3) 如果船舶具有网络平台，还必须具有隔离通信口。

除了具有上述输入，输出之外，还必须具有一定容量的各种存储器：RAM、ROM、EPROM。

图 7.2-23 是单片机组成控制单元所必须的输入输出主要芯片的示意框图。

3.2.2 可编程序控制器（PLC）控制单元

可编程序控制器是以微机处理器为基础的通用工业控制装置，它应用面广，功能强大，使用及编程方便。它的软硬件经过厂商的十分慎密的完善的设计，十分安全可靠。它是一种数字运算操作的电子系统，专为在工业环境下应用而设计的。它采用可编程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算操作的指令并通过数字式、模拟式的输入、输出、控制各类型的机械或生产过程。具有易于使工业控制系统形成一个整体，易于扩充功能的原则设计。它在船舶主机遥控中已得到大量应用。每一种 PLC 产品目前都已标准化、系列化、模块化，配备有品种齐全的各种模块供用户选用，根据需要可灵活机动地进行系统配置，组成网络，组成不同功能，不同规模地系统。

目前世界有上百个工厂研制和生产 PLC，最著名的有德国的西门子（Siemens）公司、美国的 A-B（Allen & Bradley）公司、法国施耐德（Schneider）公司、日本三菱公司等，但目前各国生产的 PLC 的编程语言还没统一，但都具有相似性。如果掌握了某一种 PLC 的编程语言，其他的编程语言就比较容易理解了。PLC 的梯形图的编程语言对于熟悉电气的技术人员来说只需几天就可熟悉和编程了。

船舶的主机遥控使用可编程序控制器作为控制单元十分合适，可以较容易实现其需要的功能。图 7.2-24 是 PLC 船舶主机遥控原理框图。

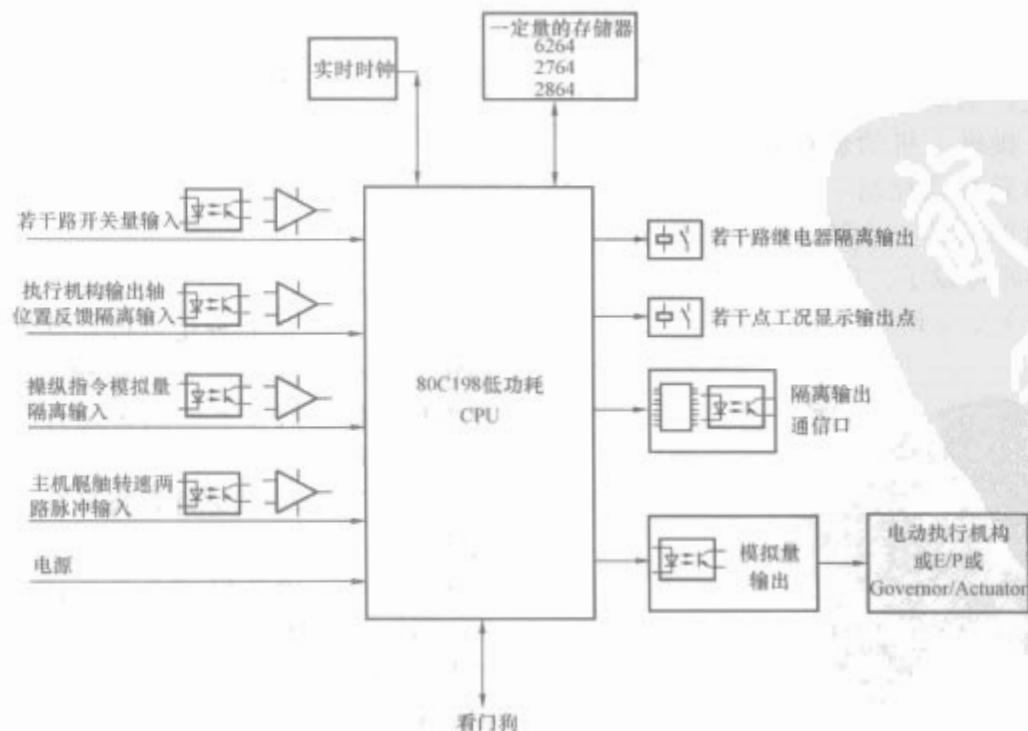


图 7.2-23 单片机控制单元输入输出示意框图

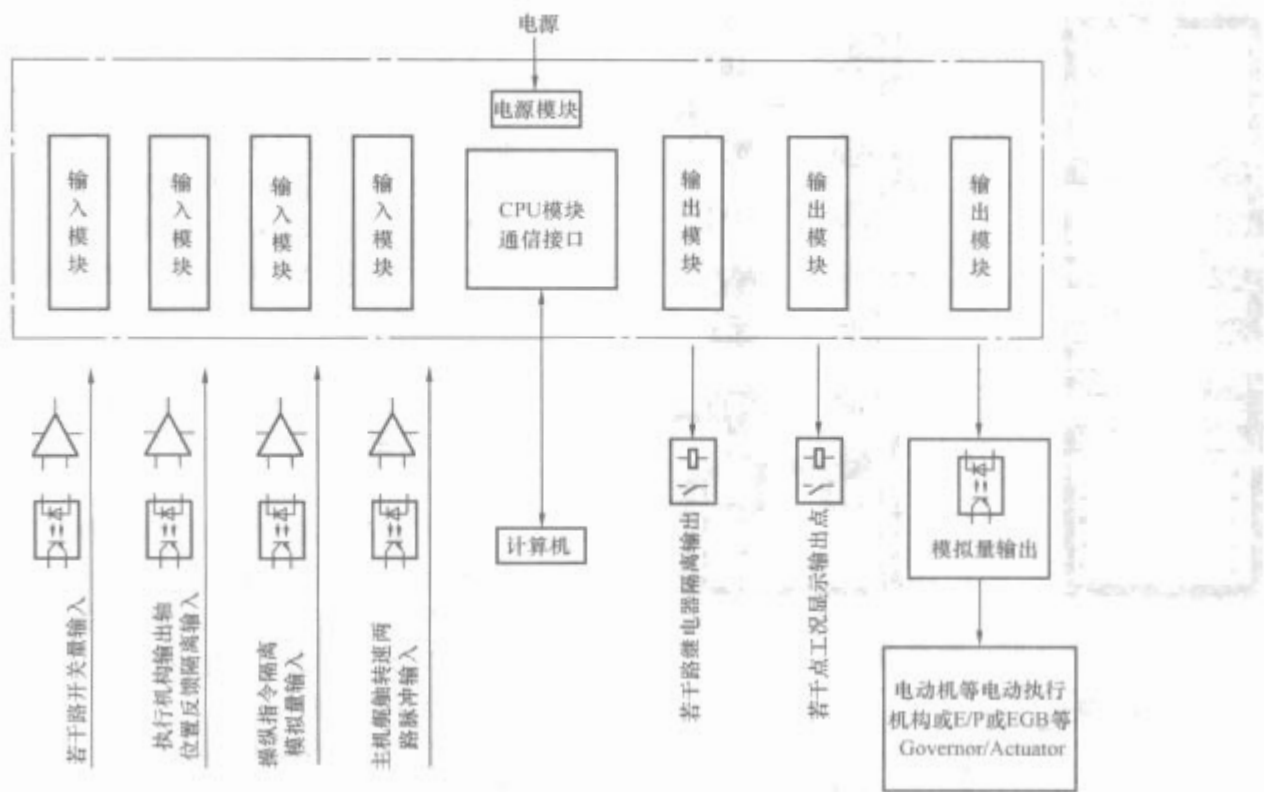


图 7.2-24 PLC 船舶主机遥控原理框图

3.3 气动阀件

船舶主机遥控中大量地使用到各种电磁阀、气动阀等气动元件。气动技术是遥控的一种最常见的基本手段，所以掌握电动、气动阀件及辅助设备的图形表达原理是十分必要的。

从功能分，常用阀件可以被归分为流向、流量、和压力三大类，它们都应在 $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 的环境里能正常工作。从结构组成特点看，有提动式、膜片式和滑阀式（船上主要用前两种）。限于篇幅及考虑到兼顾新老船舶的实际情况，对各种阀的结构只作简单介绍，即对各种阀的用途、图示符号的阅读作一定的介绍，以帮助读通船舶气、液管路控制图纸。

3.3.1 阀件结构简单举例

(1) 提动阀。又名柱塞式控制阀。它具有关闭密封的阀座，是一种静密封、效果好、寿命长的阀件。其名义直径 $\leq 4\text{mm}$ 。图 7.2-25 为提动阀示意图。

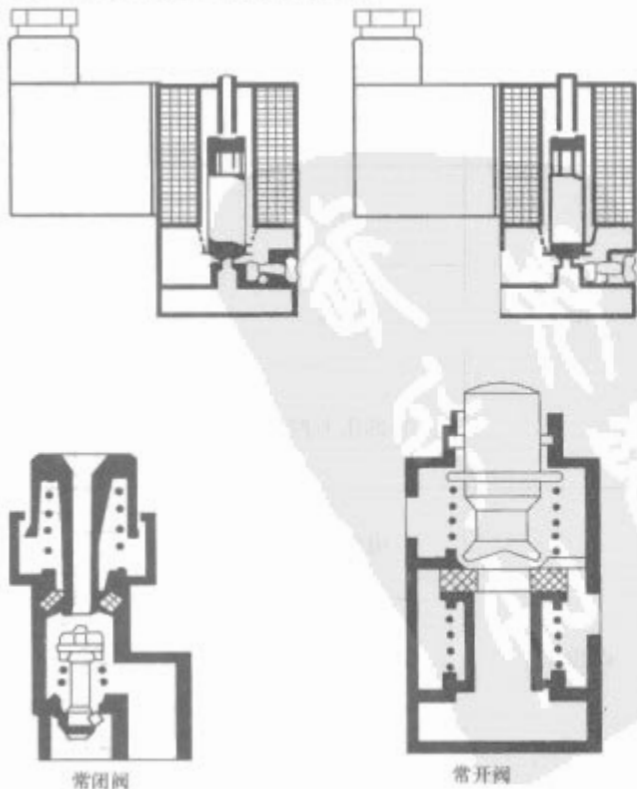


图 7.2-25 提动阀示意图

(2) 膜片阀。膜片阀和提动阀相似，也具有密封性能好、寿命长的优点，也用于较大的名义直径。图 7.2-26 为膜片阀示意图。

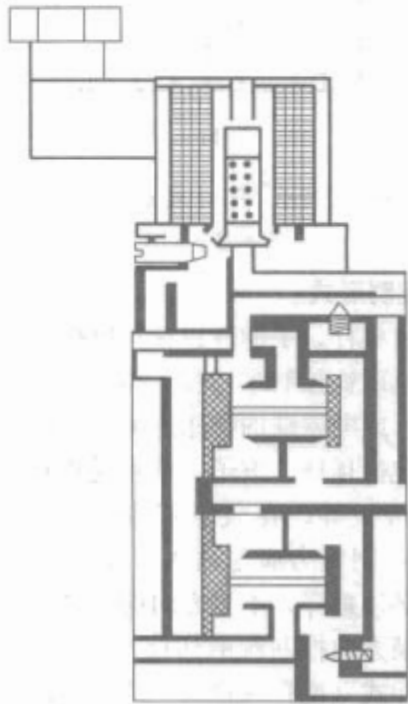


图 7.2-26 膜片阀示意图

(3) 滑阀。滑阀用 O 形圈、双 O 形圈密封（圆柱式）或陶瓷对陶瓷密封，也可用金属对金属密封。图 7.2-27 为滑阀示意图。

3.3.2 气动元件的基本规定

(1) 控制阀的表示方法。在 2/2、3/2、5/2 或者 5/3 表达式中，第一个数字符号为通气口数；第二个数字符号表示切换阀的位数。

例：3/2 控制阀
—— 开关的位置数
—— 气口数

3/2 控制阀即二位三通控制阀

(2) 气口表示法。1991 年国际标准组织施行的 ISO 标准 1219《液压气动图形符号》规定了如图 7.2-28 的气口表示法。

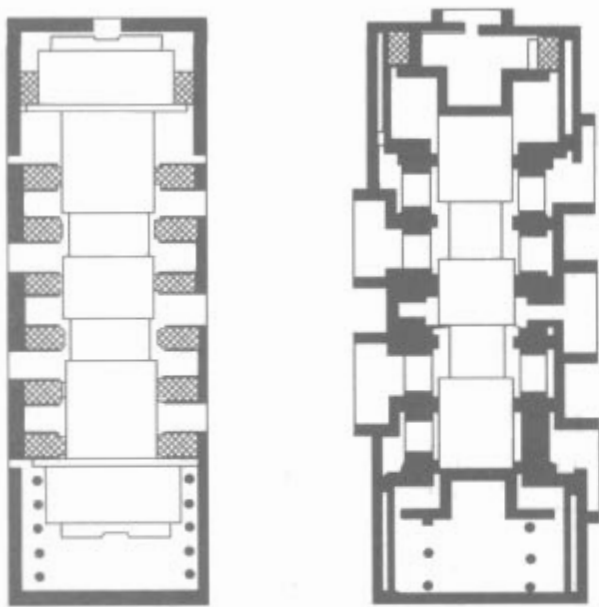


图 7.2-27 滑阀示意图

数字符号	通口
1	输入口
2、4、6	输出口
3、5、7	排气口
10、12、14	控制口

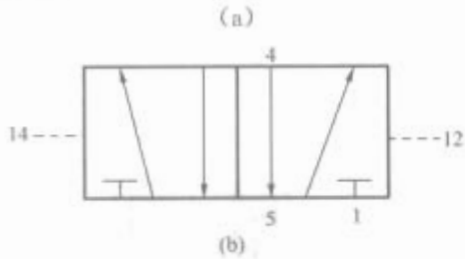


图 7.2-28 气口表示法及举例
(a) 表示法；(b) 举例

3.3.3 阀的控制形式

方向阀可由杠杆、手柄或顶杆等机械方式控制或由活塞气动控制或由电磁铁控制来切换工作位置。由弹簧或内置气压（空气弹簧）或电磁铁的作用返回至零位。

机械控制包括顶杆、滚子、单程脱扣和手动操作，如按钮、手柄、脚踏板等。在气动控制中，在 14（Z）或 12（Y）口的先导控制压力应与输入口 1 处的压力相应，所以最低操作压力必须遵守。不少方向阀可在较低的最低先导压力下工作。如果方向控制阀的切换与复位完全由气动控制，该阀就称为脉冲式（或称双稳式）阀。与弹簧或空气弹簧复位的方向控制阀不同，双稳式只要在控制口 14（Z）或 12（Y）用脉冲信号就能切换。

用电磁铁控制的方向阀称为电磁阀。小型的（直径 $\phi 4\text{mm}$ 以下）电磁阀是直接作用的，即衔铁直接带动阀心切换，最低操作压力为大气压力，特殊设计可用真空来切换。双电磁铁作用的电磁阀和双气控阀两者控制的原则是一样的。3mm 以上的电磁阀的操作要先通过先导级。由电磁阀直接作用的小型 2 位 3 通先导阀提供气压来操作主阀。该先导阀可以通过气槽从供气处引入压力气体（称内控先导），也可以从单独的气口引入（称外控先导）。先导阀一般不再设手动装置，不用电力也能使阀切换至工作位置。

任何阀操作后都能复位。复位方式有弹簧复位和空气弹簧复位两种。弹簧复位的方向控制阀，一旦切换信号终止可由弹簧使阀心复位至初始位置而与操作压力值无关，而内置空气弹簧是通过气口 1(P)来加压的。为了确保内置空气弹簧能复位，在通口 1(P)的供气压力必须不低于最小操作

压力。

3.3.4 常用符号

气动控制元部件的基本功能以及在气路上各元部件之间的相互关系都可以用相应的符号来表示，不熟悉这些常用符号就难以进一步分析和掌握遥控气路。但是要注意两点：①符号不是它们的结构缩影；②原理图上画出的元部件布局，并不是它们的实际安装位置。为全面反映各种阀在船舶上的使用，本节在介绍各种阀件时适当将老式船上使用的常用阀也列入其中（如机控阀等）。

(1) 流向控制阀。这类阀件总是有一个控制端和一个不受控端，即复位端，这类符号经分解以后可以给出以下的三个定义：

- 1) 画有外接气路的方框被称为工作部位。其外接气路的连接，可用符号表示。最常见的是管路、通大气、阻塞。
- 2) 控制端一侧方框内画出的气路通道别称为受控通道。
- 3) 不受控端（即复位端）一侧方框内画出的气路通道被称为不受控通道。

这类阀件的流向控制规律是：受控时，受控通道进入工作部位，不受控时，不受控通道进入工作部位。

流向控制法及流向控制阀的基本符号见表 7.2-2、表 7.2-3。

表 7.2-2 流向控制法基本符号

名 称		符 号
手控	按钮式	
	手柄式	
	脚踏式	
机控	顶杆式	
	滚轮式	
	单向滚轮式	
	弹簧式	
气控	加压	
	泄压	
	外部压力控制	
电控	电磁铁式	
	电磁铁带先导阀	
	电磁铁带先导阀和手动控制	

表 7.2-3 流向控制阀的基本符号

名称	图形符号	流体流向和切换	复位形式
单向止回阀		1—2 导通 2—4 不导通	气复式
		1—2 导通 2—1 不导通	簧复式
双向止回阀		“或” 门	气复式
快速排放阀		1—2 导通 1 无气, 2—3	气复式
双截断阀		与门 $p_1 \cdot p_2 = A$	气复式

(2) 节流阀。流量控制都是通过气路中的节流元件来实现的, 这些阀件的符号见表 7.2-4。

表 7.2-4 节 流 阀 符 号

名称	图形符号	节流规律	特点
节流阀		流向左右均可	节流不可调
可调节流阀		具有节流作用	节流可调
可调单向节流阀		1—2, 节流 2—1, 不节流	单向节流可调
有滤器可调节流阀		1—2, 节流 2—1, 不节流	单向节流可调带滤器
定压节流控制阀		$p_1 < p_0$ $p_1 - p_2$, 导通 $p_1 > p_0$ $p_1 - p_2$, 节流	定压 p_0 , 可 调节流可调

(3) 压力控制阀。压力控制阀的符号见表 7.2-5。
(4) 气动执行器。气动执行器在遥控气路上常常用来作为气压-机械位置之间信息的执行环节。常见的气动执行器符号见表 7.2-6。
(5) 其他有关符号。其他有关符号见表 7.2-7。

表 7.2-5 压 力 控 制 阀 符 号

名 称	图 形 符 号	调 节 规 律	输入-输出
安全阀 (溢流阀)		例如: 溢流在 0.5~1.0MPa 范围内可调	限制输入压力的最高值若超过最高值则开启排气口
减压阀 (调压阀)		输入压力保持在一定范围内输出压力可调	$p=0.7\text{MPa (7bar)}$ $A=0.05\sim0.5\text{MPa}$
精密设定阀		输入压力保持在一定范围内输出压力可调	—
气控调压阀		若 14 的压力小于 1 的压力 则 $2(A) = 14(p)$ 若 14 的压力大于 1 的压力 则 $2(A) = 1(p)$	—
过滤减压阀		带分水过滤器减压阀	—
压力开关		转换式	气电信息变换切换压力有可调与不可调的
		常闭式	
		常开式	
压差开关		压力 0.008MPa 有效	输入: p_A, p_B 输出: 接点切换

表 7.2-6 气动执行器符号

名 称	图 形 符 号	调 节 规 律	调 试 工 作
单作用执行气缸		$p=0$, 活塞左移 p =弹簧复位	—
双作用执行气缸		$p_1=1, p_2=0$, 活塞居右 $p_1=0, p_2=1$, 活塞居左	—
三位置执行气缸		$p_0=1$ (前提条件) $p_1=1, p_2=0$, 活塞右移 $p_1=0, p_2=1$, 活塞左移	—
气压-位移变换器		p 有气压输入, L 就有相应的角位移输出变化	弹簧作用力可调 L 起始位置可调
		p 有气压输入, L 就有相应的线位移输出变化	
电气变换器 (又称 E/P)		当标准电信号输入, E/P 输出相应气压	电气变换器是近 10 年出现的新形元件, 一般均有零位和斜率可调
		当标准电信号输入, E/P 输出相应气压, 它通过调节两个可控继动阀的面积达到符合指令所要求的输出气体的压力	

表 7.2-7 气源与管路符号

气 源 符 号			管 路 符 号		
名 称	图 形 符 号	说 明	名 称	图 形 符 号	说 明
气源组合装置		简化符号	工作管路		
过滤器		用以滤除固体杂质	控制管路		
水分离器		用机械方法析出水滴(凝结), 手动放水	管路连接		
水分离器		自动放水	交叉管路		
分水过滤器(人工排出)		手动放水	柔性管路		
分水过滤器(自动排出)		自动放水	气源		
空气干燥器		使压缩空气干燥至规定压点	接头堵塞		
油雾器		用以使压缩空气增加油雾以润滑下的器件	可拆卸管路的接头		
截止阀			有接管排气口		
压力表			无接管排气口		
			消音器		
			压缩空气罐		

(6) 遥控气源。在用气作为动力的遥控系统中,其气源必须满足以下要求:

1) 压力。遥控气源要求具有 0.7MPa (7bar) 的压强,允许有 $\pm 10\%$ 的波动。

2) 干净。遥控气压必须经过多次过滤。气体中含有杂质颗粒的大小应低于 $50\mu\text{m}$,有的甚至要求低于 $20\mu\text{m}$,如 E/P 等最好用低于 $5\mu\text{m}$ 左右的。

3) 干燥。遥控气压要求不含有水分,它可以通过分水过滤器、烘烤、化学吸收等方法来达到脱水目的。最常用的是用分水过滤器的方法解决。

如果有必要的话,在气路上采用二次滑油雾化处理,使某些活动部件得到润滑,如有些气缸等。

遥控气源一般取自机舱储气瓶,也可由单独的气源设备提供。但储气瓶提供的 3MPa (30bar) 气压必须经过严格的净化、减压、干燥处理,然后才能引送到遥控气路中。

3.3.5 维护和检查

气动遥控元件的日常维护工作比较简单,但是轮机人员必须认识到定期保养的重要性,应根据设备和运行的具体情况,制定并执行定期保养制度。应建议按以下周期来进行维护、检查和调校工作。

(1) 1~7 天。对过滤器、气罐定期排放污水。并注意查看有关的液位情况。

(2) 0.5~1 年。更新空气过滤器中的过滤材料,对遥控气路认真进行漏气检测,并修补漏气处。

(3) 每隔 2 年。对气压强度在 3.0MPa (30bar) 以下的气动元件进行维护检查,例如气缸、执行器等。

(4) 每隔 4 年。对气压强度在 1MPa (10bar) 以下的气动元件,即大多数阀件应进行维护,检测工作。

(5) 4~8 年。对密封垫片之类的橡胶产品,即使没有表面破损情况也应予以更新。

(6) 原则上经过 8 年长期使用后,对于 1MPa (10bar) 以下的气动元件都要更新。以确保安全和可靠地工作。

在进行维护检查工作时,对金属零件应用清洗油清洗,对橡胶制品应用肥皂水清洗,发现老化、损坏必须更换。在安装时,要用低压气吹净并给予必要的润滑。

3.4 电/气转换器

电/气转换器又叫电/气调节器、电/气比例阀,一般用 E/P (Electric/Pneumatic) 表示,是一种在遥控中经常使用的部件。它的基本原理是:在指令信号的控制下,以一定的比例关系,迅速而精确地将指令电信号转换成具有一定压力的输出气源信号,以此推动执行机构,控制柴油机的油门开度,调节柴油机的运转速度,如图 7.2-29 所示。

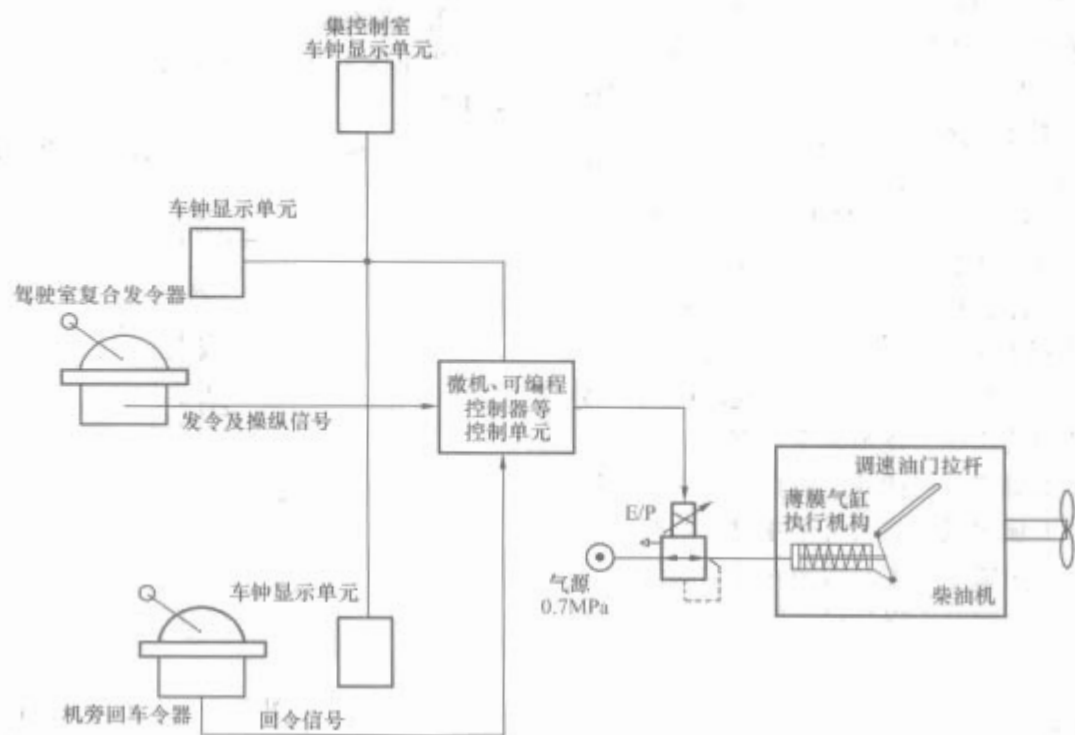


图 7.2-29 包含电/气转换器的船舶柴油机控制系统

目前各种设计的电/气转换器形式很多,精度较高,耗气量较少。这里介绍两种电/气转换器的基本工作原理。

3.4.1 薄膜阀型电/气转换器

薄膜阀型电/气转换器原理示意如图 7.2-30 所示。

当外接电信号(如 4~20mA, 0~5V, 0~10V)输入到转换器的电路板后,电路板上的控制电路马上将其输入的电信号与电路板从测量输出气压的压力传感器上的压力电信号进行对比。如果输入电信号大于输出气压的电信号,则电路板输出一个电信号给磁性薄板,是磁性薄板靠近喷嘴,从而使得喷嘴喷出的流量减少,从进气口来的气流通过恒节流孔到达薄膜上部,气腔的背压升高,迫使薄膜带动阀心向下运动,使得进气口输出到出气口的气流量增加,输出端的气压升高,从而使得压力传感器上的电信号趋向从外部输入的电信号,直到一致。之后喷嘴发出的气流量稳定在一个使得输入信号和压力传感器测到的电信号相一致的稳定点上。达到

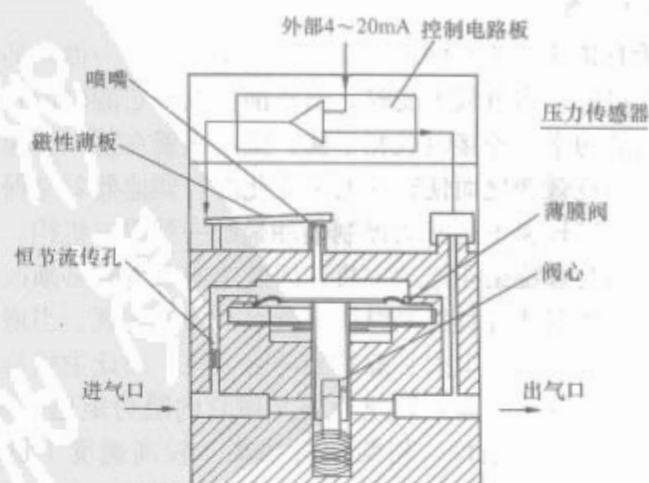


图 7.2-30 薄膜阀型电/气转换器原理示意图

输出气压和输入电信号——对应的比例关系。例如输入 4~20mA, 输出气压信号 0~0.5MPa。

3.4.2 双继动阀型电/气转换器

双继动阀型电/气转换器原理示意如图 7.2-31 所示。

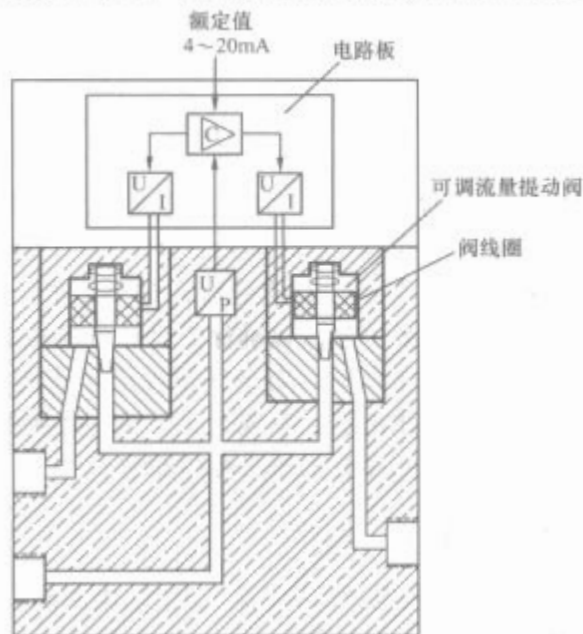


图 7.2-31 双继动阀型电/气转换器原理示意图

图中 U/P 为压力传感器。其左右各有一个可调流量面积通道的提动阀。图上方是电路板中有两个 U/I 功能电路及一个控制电路 C。当外接指令电信号输入到转换器电路板的控制电路 C 时，电路板上的控制电路即将输入信号与从压阻式压力传感器上测得的输出气压电信号进行比较。比较的结果如果是外输入指令信号大于传感器的信号，则表明输出气压还需加大，此时控制电路指令右边 U/I 电路加大电流的输出，提高右边提动阀阀心的控制面积，加大输入流量，提高输出气压的压力，同时指令左边的 U/I 电路减少电流或截止电流输出，减少或截止左边提动阀阀心的控制面积，同样起到提高输出气压的作用；反之，如果比较结果是外输入指令信号小于传感器的信号，则控制过程正好相反，即左边提动阀逐渐加大阀心控制面积，而右边提动阀减少或截止控制面积，从而使得输出压力逐渐减少，直到输出压力符合指令信号的要求。而如果经过两阀的调整，使得输出压力符合输入的指令信号而输出气流量又等于零时，两阀可以截止；如果有一定的气流量输出，则右边输入提动阀保持一个很小的流量控制截面，使得既能保持稳定的输出压力，又保持一定的气流量。

3.5 调速器及执行机构

3.5.1 调速器

3.5.1.1 概述

所有柴油机的不同转速都是改变柴油机每一循环的喷油量来获得的。当负载不变时，给柴油机以一定的燃油量，使柴油机的功率与外接负载相平衡，柴油机就在某一转速平稳运行。当负载变化而使转速发生变化时，调速器就是保证柴油机在一定转速下运行而控制喷油量的一种重要机构。

作为与螺旋桨相连的主机，因航速需改变时必须改变其转速，这种调速可直接操纵油量调节机构来实现。当增加喷油量时，主机的转矩大于螺旋桨的阻力矩，因此主机与之相连的螺旋桨转速升高，转速升高又使它的阻力矩迅速增大，故产生新的平衡条件，使柴油机在某一较高速度下稳定下来。反之亦然。但是当船舶遇到风浪而纵倾时，会使螺旋桨露出水面，此时外界负载突然卸去而造成飞车，造成重大事故。为防止事故发生必须采取如下两种措施：①在调速器上设置一个极限转速位置，以便在转速超过正常值时能对

油量调节机构起作用，使喷油量减少，阻止转速进一步提高。而在柴油机正常工作时不妨碍人工直接操纵油量调节机构，以便按照需要改变柴油机的转速。②有必要使柴油机的转速不随外界负载的变动而波动，所以一般情况调速器都设计成能够随外界负载的变动而自动调节喷油量，保证柴油机在此转速下稳定运行，即具有 PID 调节功能。而有这些功能的调速器称为全制式调速器。

3.5.1.2 调速器类型

老式的调速器按用途可分为三种：即极限调速器、定速调速器、全制式调速器。若按传递动力的方式，又可分为机械式（直接作用式）和液压式（间接作用）两种。机械式调速器直接利用“飞重”的离心力去移动油量调节机构，而液压式调速器则利用“飞重”的离心力控制一个功率放大器（伺服器），再利用液压产生的更大的动力来移动油量调节机构。在船舶上不管什么样的调速器都设有如上面所说的一个附加的超速安全装置。这种装置设有两个极限位置，当处于第一个极端位置时，对喷油泵调节机构不起作用，当主机转速超过某一危险转速时，它就迅速移动到第二个极限位置，推动油量调节机构，使喷油完全停止（有时只是暂时停止）此后为使柴油机重新工作，必须通过手动操作（也有自动的）使该装置回到原来位置。

3.5.1.3 调速器基本原理

限于篇幅，这里介绍在船上常用的机械式调速器、全制杆式调速器，以及近年来发展起来的电子式调速器和电喷式调速器。

(1) 机械式调速器。机械式调速器如图 7.2-32 所示。

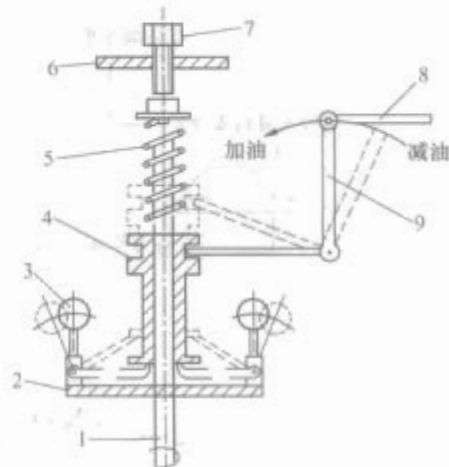


图 7.2-32 机械式调速器

- 1—转轴；2—飞重座架；3—飞重；4—套筒；
5—调速弹簧；6—本体；7—转速调节螺钉；
8—油量调节杆；9—连接角杆

调速器的飞重、调速弹簧等重要部件是调速器不可缺少的部分。图中的飞重等除电子式、电喷式调速器外都具有。

图中，由飞重 3 和弹簧 5 组成的感应元件式按力平衡系统工作的。当柴油机发出的功率与负载平衡时，就在某一转速下稳定工作。此时飞重 3 的位置如图中用实线的圆表示，它所产生的离心力（通过钩脚作用在套筒 4 底部）恰好与弹簧 5 的预紧力相平衡，油量调节杆 8 也停留在某一喷油量位置。若外界负载突然减少，柴油机发出的功率就大于负载而使转速升高，此时飞重离心力将大于弹簧的预紧力而使套筒 4 上移，增加弹簧的压缩量，同时通过角杆 9 拉动油量调节杆 8 以减少喷油量。这说明，调速器根据负载的变化起着调节油量的作用（即柴油机输出功率）。当调节过程结束，柴油机的功率就与负载都在减少了的情况下达到新的平衡。调速器的飞重也稳定在图示虚线的圆位置。它的离心力和弹簧

的作用力也在彼此都增大的情况下恢复平衡。当负载增加时,调速器动作与上述相反。

从上述情况可知,这机械调速器不能保持柴油机调速前后的转速不变,即负载变化后转速不能恢复到原来转速。即当负载减少时,转速稍变高;当负载增加时,转速稍变低。产生这种转速差的原因是感应元件与油量调节杆之间的刚性连接所造成,因为当负载变动时,喷油量相应变动才能保持转速稳定。另外这种调速器在稳定工况下还会存在转速波动(游动),这时因为调速器的感应元件和油量调节机构的杆件之间存在着摩擦阻力,这个阻力的存在当转速稍变化时使调速器不能产生调油动作;另外当杆件之间间隙过大,由于机器的振动,油量调节杆也存在细微移动,也造成转速的波动;再有柴油机各缸负载不均加重了曲轴回转的不均匀性,加速转速的波动。

(2) 全制式调速器。机械式调速器构造简单,维护方便,故应用于高速小型柴油机上,但调节精度不高。在大中型船舶柴油主机中均采用灵敏度高的液压杆式调速器。

液压杆式调速器工作原理如图 7.2-33 所示。

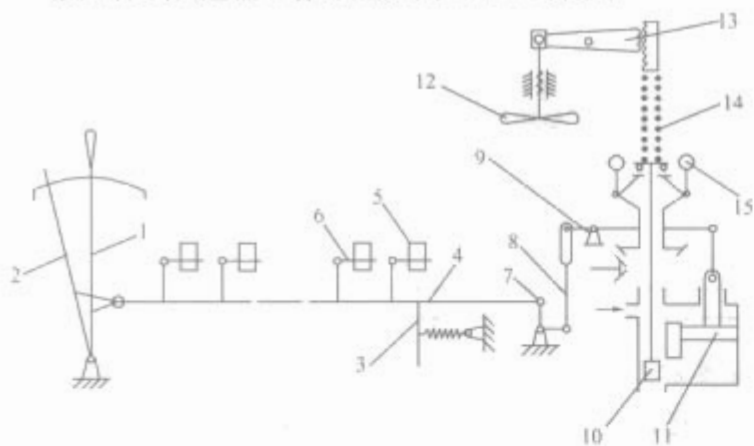


图 7.2-33 液压杆式调速器工作原理

1—燃油杆; 2—负载指示器; 3—拉杆; 4、5、6—调节杆;
7—折角摇杆; 8、9、13—杆; 10—滑阀; 11—伺服活塞;
12—手轮; 14—弹簧; 15—飞重

图中喷油泵的调节杆 5 通过调节杆 4 与拉杆 3 相连,调节杆 4 一端与负载指示器 2 相连,另一端通过折角摇杆 7、杆 8、9 与调速器的伺服活塞 11 相连。图中飞重 15 的动作通过特设的滑阀 10 使压力油作用在伺服活塞 11 上,由伺服活塞放大的力作用杆 9、8、7,使喷油泵的油量调节杆动作。弹簧 14 的预紧力通过杆 13 由调节手轮 12 控制。为了使柴油机在选定的转速下稳定工作,可先转动手轮 12,给弹簧 14 以一定的预紧力,再将燃油杆 1 推至相应的位置。由于燃油杆 1 不与调节杆 4 连接,只起限制喷油量的作用,故它的动作不影响喷油泵的油量调节杆。在运行中,由于弹

簧预紧力加大,滑阀下移,压力油作用于伺服活塞 11 的下面,并推动伺服活塞上移,于是调节杆 4 右移并增加喷油量,与调节杆 4 相连的负载指示器 2 随之移动,直至与燃油杆 1 相接触,柴油机即以选定的转速稳定运转。若要降低柴油机的转速,可转动手轮 12 使弹簧 14 的预紧力减少,调速器即拉动喷油泵的调节杆使喷油量减少,负载指示器 2 也随之向左移动。或者直接向左移动燃油杆 1,通过负载指示器拉动油量调节杆左移,柴油机又在降低了的转速下稳定运转。当外界负载变动时,飞重也能使滑阀动作,伺服活塞也就改变喷油泵的喷油量,从而自动保持柴油机在既定的转速下稳定工作。

全制式液压杆式调速器发展到目前已有几十年的历史,长期以来是船舶主机的调速器的主力军。国外主要调速器生产商美国的 WOODWARD 公司几十年来发展了一系列产品。几个代表性的产品有 1973 年推出的 UG-40 液压杆式调速器,较好的解决了调速器的各方面的问题。1974 年推出用空气信号来设定柴油机转速的 GGA Governor 调速器。1986 年推出了 PGA-EG 调速器,它既能用模拟及数字的电信号设定主机转速,又能用气动信号设定主机转速。2000 年推出了一种电控调速器 723plus Digital Control Standard Applications 与之相配套的是一个直行程的步进电动机,这些产品都较好地解决了船用主机调速器所要解决的问题。

(3) 电控式调速器。在这里暂将电控式调速器定义为用电子元器件(微机、PLC 及各种集成电路组成的控制单元)、放大器及伺服电动机或者用电/气执行机构代替放大器及伺服电动机来控制柴油机油门拉杆,从而控制柴油机喷油功能及转速的装置叫做电控式调速器。如图 7.2-34 和图 7.2-35 是两种电控式调速器的示意图。

从图中可知,控制单元的控制是闭环控制。从处理运行速度方面来看,①操纵指令的转速给定信号;②由于外部负载变化引起的转速波动的反馈信号,这些信号经过微机等控制单元的处理,使得柴油机的转速尽可能地保持在指令规定的转速上恒定运行。这就是进行 PID 调节。其他信号的处理主要是为保护柴油机安全运行方面的问题,这里不多赘述。由于船用主机的功率很大,其燃油油门拉杆需要的拉力较大,行程较长,所以使用伺服电动机等电动执行机构较妥当。如果选用 E/P 加上膜片执行器,或 E/P 加长行程执行器或由双继动阀型电气转换器加具有行程位移传感器的双作用气缸也很好,但是采用伺服电动机、电动执行器(机构)形式的调速器反应速度较快。

(4) 电喷系统调速器。图 7.2-36 是由电喷系统调速器的原理示意图。

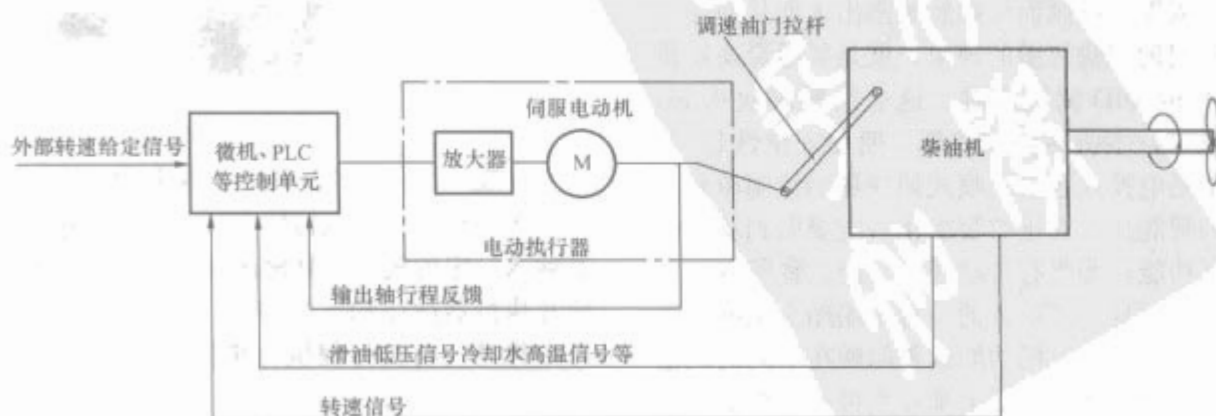


图 7.2-34 电控式调速器

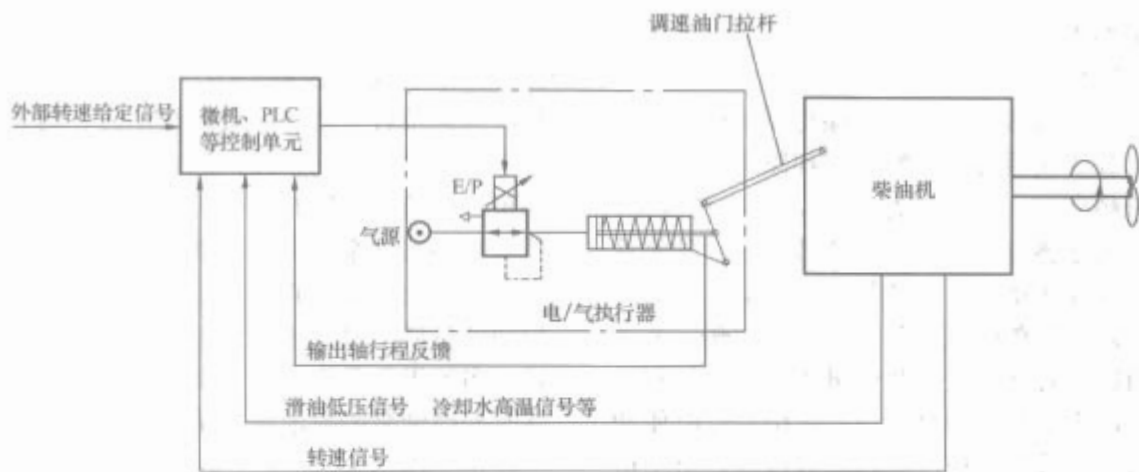


图 7.2-35 电控式调速器示意

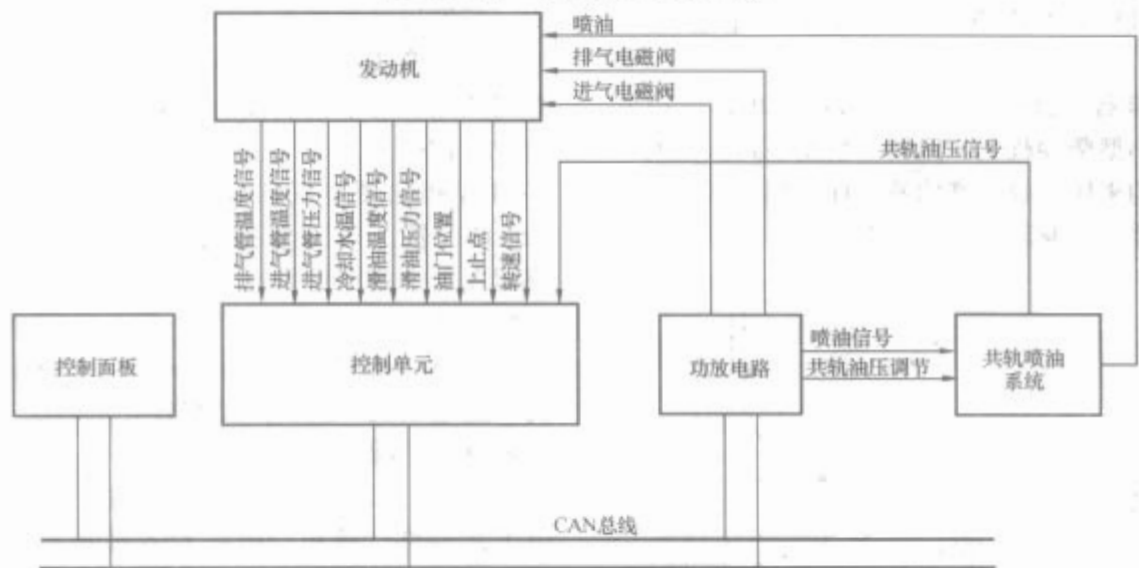


图 7.2-36 电喷系统调速器原理示意

图中除去发动机外，共有 5 个部分组成，①遥控控制面板；②主机接口单元；③控制单元；④功放电路；⑤共轨喷油系统。控制面板应包含有传令器，操纵器，工况显示等内容。通过网络总线（例如 CAN 总线）和控制单元，和主机接口单元进行数据交换。控制面板向控制单元发出操纵指令（转速给定指令等）。主机接口单元对主机的工况进行监测，将主机的各项参数进行处理后送给控制单元，这些参数是决定基本喷油量的关键因素及确定喷油系统中电磁阀的开启时间的转角位置。当控制单元接到从控制面板及主机接口单元来的各种参数后经过逻辑处理，向喷油系统发出控制油压的信号及喷油脉冲。喷油系统中具有高速强力电磁阀的喷油器接到从控制单元来的喷油脉冲信号执行对主机的喷油动作，达到控制柴油机转速的目的。

3.5.1.4 船用调速器的发展方向

船用主机调速器是船舶主机推进系统中的一个极其重要的部件。船用主机调速器的发展方向，也是主机遥控发展的关键性方向。这个方向就是处理好由于船舶在有风浪航行状态下产生较大可变周期的纵倾而使螺旋桨露出水面从而使主机转速发生不定时间的忽快忽慢的现象，就是要尽量高质量的解决好船舶主机的 PID 调节问题。这个问题解决得好，船舶主机运行越稳定，主机故障率越低，船舶安全性越好。从现在来看，无论是电控式还是电喷式调速器的控制单元一定要真正意义上的智能化。真正的智能化一定要做到基本两点：①要有记忆功能；②要有自动选优功能。在所有工业控制中这两点是基本而且不可缺少的。对于船舶主机推进系统（遥控系统）而言，所谓记忆功能就是船舶在不同的风浪航行状态下运行的调节性能要记忆下来，当再一次相近状态下运行时，再记下来，然后比较两次的优劣，选择好的那一次运行，并记住好的那次的调节状态的参数。周而复始，运

行一次提高一次，逐渐达到各种相近运行状态下完美的运行状态。

3.5.2 执行机构

执行机构有气动执行机构和电动执行机构。调速器和执行机构时密切配合的不可分开的。实际上许多调速器本身就包括了执行机构部分，只是在有些情况下将其分开了。

3.5.2.1 气动执行机构

(1) 气动膜片执行器。以国内某厂商生产的 HW-3 为例，如图 7.2-37 所示。

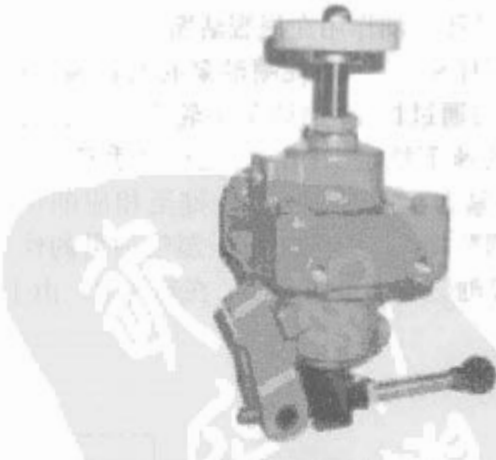


图 7.2-37 气动膜片执行器

在表 7.2-9 中的气压位移变换器（名称叫法不同），即是其图形符号。该执行器实际上是一个单作用膜片气缸，当其输入一定的气压，其输出轴行程就相应伸出一定距离。此膜片执行器往往和 E/P 相配合，用于中小船舶主机上。另外一种气动长行程执行机构，如图 7.2-38 所示，用于大型船舶。

(2) 伺服定位气缸。图 7.2-39 是某种双作用定位气缸。该气缸上面有一气缸输出行程位置的测定器，以电信号

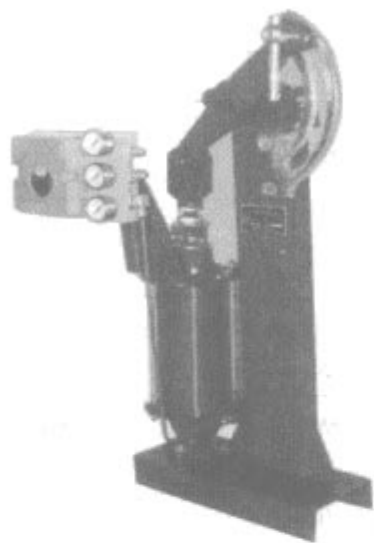


图 7.2-38 气动长行程执行机构

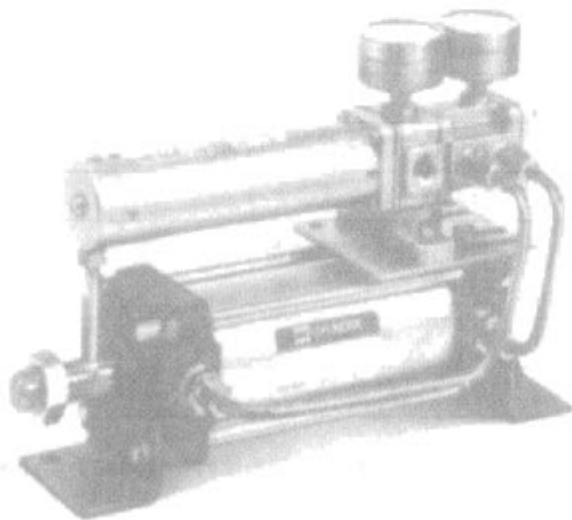


图 7.2-39 双作用定位气缸

形式输出其轴的行程，此信号可反馈给控制单元。

3.5.2.2 电动执行机构

电动执行器（机构）早已广泛的应用于发电、冶金、石油化工、轻工等部门，实际上就是电子调速器的执行部分。它分两种形式，即角行程式和直行程式。当输入标准电信号（如 0～10V 或 4～20mA）后，执行机构输出轴就转动一个含有一定力矩的角度或一个有一定推拉力的直线行程。图 7.2-40 是 DKZ 型电动执行器，图 7.2-41 是 DKJ 型电动执行器。

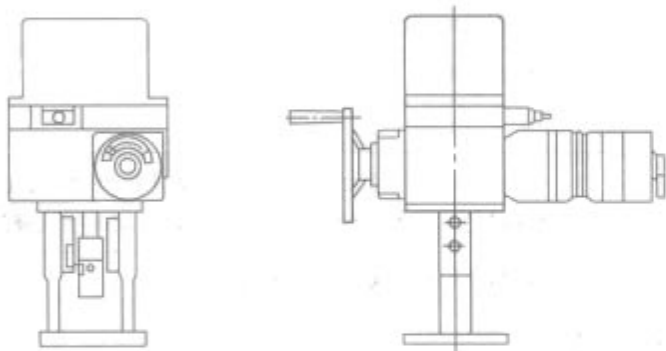


图 7.2-40 DKZ 型电动执行器

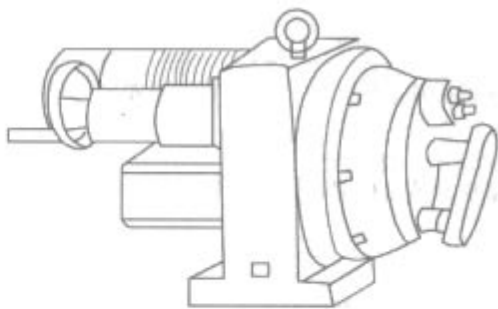


图 7.2-41 DKJ 型电动执行器

4 船舶主机遥控系统设计

4.1 常用设计规范及标准

4.1.1 常用船级社规范

- 《中国船级社（CCS）规范》；
- 《美国船级社（ABV）规范》；
- 《劳氏船级社（LV）规范》；
- 《法国船级社（BV）规范》；
- 《挪威船级社（ND）规范》。

4.1.2 相关国家标准

- GB/T 3475—1983《船用柴油机调速系统技术条件》；
- GB/T 3476—1983《船用柴油机调速系统试验方法》；
- GB 3260—1985《船舶大功率主柴油机遥控装置技术条件》；
- GJB 4000—2000《舰船通用规范 2 组 推进系统》；
- GJB 4000—2000《舰船通用规范 3 组 电力系统》；
- GJB/Z 299A—1991《电子设备可靠性预计手册》；
- GJB 900—1990《系统安全性通用大纲》；
- GJB 909—1990《关键件和重要件的质量控制》。

4.2 系统主要性能指标

4.2.1 数据测量显示性能指标

- 系统测点容量：500～4096 点。
- 测点型式：开关量 无源触点。
- 热电偶 K 分度 mV 电压。
- 热电阻 Pt100，Pt1000。
- 压力变送器 电流 4～20mA。
- 脉冲频率信号 有源 TTL 方波或无源磁电式交流脉冲。
- 测量精度 ±0.5%～±1%。
- 显示精度 一次仪表：1.5%～2.5%。
- 二次仪表：1.0%。
- 事件响应时间 1～2s。

测量参数内容见表 7.2-8。

表 7.2-8 重要参数表

序号	项 目	显示	报警	备 注
1	柴油机或轴系的转速和转向	转速及转向	进入转速禁区范围运行	—
2	柴油机超速	—	超速时	自动停车
3	柴油机滑油进机压力（如设有齿轮箱时包括齿轮箱）	压力	低	若设有独立驱动的备用泵，备用泵应自动起动投入工作
4	柴油机滑油进机压力（如设有齿轮箱时包括齿轮箱）	压力	低	自动或手动降速

续表

序号	项 目	显示	报警	备 注
5	柴油机滑油进机压力（如设有齿轮箱时包括齿轮箱）	压力	过低	自动停车
6	柴油机滑油出机温度（设有齿轮箱时包括齿轮箱）	温度	高	—
7	滑油进蜗轮增压器压力	压力	低	与主柴油机滑油系统连在一起的或自成内润滑系统的 的不要求
8	滑油进蜗轮增压器温度	温度	高	与主柴油机滑油系统连在一起的或自成内润滑系统的 的不要求
9	蜗轮增压器滑油重力油柜油位	—	低	若设有滑油重力油柜时
10	柴油机气缸滑油注油器出油量	—	少	若设有气缸油注油器时，每只注油泵组设一个传 感器
11	柴油机滑油滤器前后压差	—	大	如设有时
12	柴油机滑油循环柜油位	—	低	—
13	柴油机气缸冷却水出口温度	温度	高	各缸冷却系统分开时应每缸设置
14	柴油机气缸冷却水出口温度	温度	过高	自动或手动降速
15	柴油机气缸冷却水进机压力	压力	低	若设有独立驱动的备用泵，备用泵应自动启动投入 工作
16	柴油机冷却水膨胀水箱水位	—	低	—
17	柴油机海水冷却水压力	压力	低	—
18	柴油机活塞冷却液进口压力、出口温度或流量	压力或温度	压力低、温 度高或流量小	当设有活塞独立冷却系统时，自动或手动降速
19	柴油机喷油器冷却液压力	压力	低	当喷油器冷却为独立系统时要求
20	柴油机燃油低压输送泵出口压力	压力	低	若设有独立电力驱动的备用泵，备用泵应自动启动 投入工作
21	燃油温度或黏度	温度或黏度	低或大	对重油的要求
22	柴油机日用燃油柜油位	—	高、低	—
23	柴油机排气温度	温度	高	对中、低速柴油机要求每缸设置，自动或手动降速
24	柴油机蜗轮增压器排气出口温度	温度	高	—
25	二冲程主柴油机扫气温度	温度	高	低速机每缸设置。中、高速机在空气冷却器后的扫 气总管内置，自动或手动降速
26	柴油机起动空气压力	压力	低	主起动阀前压力
27	柴油机起动蓄电池电压	电压	低	电起动时
28	柴油机连续起动失败或起动时间过长	—	停止再起动时	—
29	柴油机主轴承温度或主柴油机曲轴箱油雾浓度	—	高	气缸直径大于 300mm 时或对主柴油机滑油进机压力 过低时的自动停车设置越控时要求，自动或手动降速
30	柴油机曲轴箱压力	—	高	设有曲轴箱油雾浓度监测时可免设
31	控制、报警和安全系统动力（液压或气压或电 压）	压力或电压	失效时	—
32	正在工作的控制单位	控制部位	—	—
33	柴油机紧急停车	—	紧急停车时	—
34	柴油机越控	—	越控操作时	—
35	空气压缩机滑油压力	—	低	—
36	空气压缩机空气排出压力	—	高	—
37	净油机水封	—	水封破坏	若设有自动控制的净油机时
38	净油机进油温度	—	高	若设有自动控制的净油机时
39	燃油和滑油加热温度	—	高	—
40	污油柜油位	—	高	—

续表

序号	项 目	显示	报警	备 注
41	隔声罩空气温度高	—	高	—
42	隔声罩内发生火灾	—	火灾时	自动停车, 不能越控
43	离合器的电力、气动或液压力	—	不足时	—
44	离合器所处状态	接上或脱开	—	—
45	轴系制动器所处状态	刹紧或松开	—	—
46	推力轴承温度	温度	高	自动或手动降速
47	轴系中间轴承温度	温度	高	—
48	润滑油的尾管轴承温度	温度	高	当尾管轴承用油润滑时要求
49	尾管滑油柜油位	—	低	当尾管轴承用油润滑时要求
50	调距桨遥控站到液压执行机构的控制动力	—	失效时	—
51	控制调距桨桨叶螺距角执行机构的液压系统压力	压力	低	—
52	调距桨液压油温度	—	高	当设有液压油冷却时要求
53	调距桨液压油柜油位	—	低	—
54	调距桨重力润滑油柜油位	—	低	当设有重力润滑油柜时要求
55	调距桨桨叶螺距角	螺距角	—	—

4.2.2 监控网络性能指标

(1) 网络拓扑结构。上层网: 高速工业以太网/CAN 现场总线网/PROFIBUS/……; 下层网: CAN 现场总线网/PROFIBUS/……。

(2) 网络介质。上层网: 光纤/双绞线; 下层网: 双绞线。

(3) 网络传输速度。上层网宽带 10~100Mbit/s; 下层网约 100k bit/s。

4.2.3 程序控制性能指标

- 操作部位转换。
- 主机起动停车 (起动联锁/三次重复起动/重起动)。
- 换向控制 (离合器结合/脱开)。
- 转速调节。
- 负载程序控制 (冷热机加减速速率/机桨联动)。
- 并车机组负载控制 (负载转移/负载平衡)。
- 负载限制 (扭矩限制/扫气压力限制/最大负载限制)。
- 安全保护。
- 应急操纵。

4.2.4 调速性能指标

瞬时调速率 δ_d : 是指柴油机突卸或突增 (分段或一次) 全负载后的最大或最小转速与负载变化前稳定转速的差与标定转速之比, 以百分数表示。

稳态调速率 δ_{st} : 是指柴油机卸载或增加全负载后的稳定转速与负载改变前稳定转速的差与标定转速之比, 以百分数表示。

转速稳定时间 τ : 是指从负载突变, 转速骤然起到转速开始进入波动允许范围为止, 其所经历的时间。

主机遥控系统在柴油主机突卸负载和突增 (一次或分段) 负载时, 保证瞬时调速率 δ_d 、稳态调速率 δ_{st} 及转速稳定时间 τ 应不大于表 7.2-9 的规定。

转速波动率: 转速波动率是指柴油机在负载不变的工况下运行, 在一定时间内测得的最大转速和 n_1 和最小转速 n_2 的差与两倍标定转速之比, 以百分数表示。

主机遥控系统应保证柴油机的转速波动率不大于表 7.2-10 中的规定。

表 7.2-9 瞬时调速率、稳态调速率及转速稳定时间

性能指标	负载变化	突卸或缓卸 100%→0 突增或缓增 0→100%		
	精度等级	δ_d (%)	δ_{st} (%)	τ (s)
	1	2	5	2
	2	3	7	3
	3	5	10	5
	4	10	高速机: 12 中低速机: 15	—

表 7.2-10 转速波动率

柴油机油况	精度等级	1	2	3	4
	转速波动率	ν (%)			
空载转速与标定转速比	<50%	—	—	1.5	2.5
	≥50%	—	—	1.0	2.0
按推进特性工作时对应转速与标定转速比	<50%	—	—	1.0	2.0
	≥50%	—	—	0.7	1.5

4.2.5 负载控制要求

主机遥控系统对并联运行的柴油机的负载控制, 其负载分配额度差 θ 应控制在 15% 以内。

4.2.6 可靠性和可维性指标

一般要求, 主机遥控系统的平均无故障时间 $MTBF \geq 10\,000h$ 。

主机遥控系统的平均维修时间 $MTTR \leq 0.5h$ 。

4.3 设备工作环境条件

(1) 环境空气温度。主机遥控系统应能在表 7.2-11 所

述环境空气温度下正常工作。

表 7.2-11 环境空气温度		℃
安装位置	温 度	
一般围蔽处所和有空调的围蔽处所	5~55	
有散热设备且无空调的围蔽处所	5~70	
开敞甲板、无保温措施的甲板室	-25~70	

(2) 相对湿度。主机遥控系统应能在下列相对湿度下正常工作:

温度低于 45℃时: 95%±3%。

温度高于 45℃时: 70%±3%。

(3) 振动。主机遥控系统应能在表 7.2-12 所述振动条件下正常工作, 如在频率范围内发生共振, 并当振动超过要求值时, 应采取适当措施予以抑制。

表 7.2-12 振 动		
安 装 位 置	振 动 参 数	
一般处所	2.0~13.2Hz 振幅±1mm	13.2~100Hz 加速度±0.7g
往复机械上(例如柴油机、空压机上)及其他类似处所	2.0~25Hz 振幅±1.6mm	25~100Hz 加速度±4.0g
其他特殊部位, 例如柴油机(特别是中、高速柴油机)的排气管上	40~2000Hz 加速度±10.0g(温度 600℃)	

(4) 倾斜及摇摆。主机遥控系统应能在各方向倾斜及摇摆 22.5°(周期 10s) 以及垂直方向线性加速度±9.8m/s²时正常工作。

(5) 其他环境因素。主机遥控系统应能适应船上盐雾、油雾、霉菌及灰尘等环境。

(6) 电磁兼容性。主机遥控系统应具有必要的电磁兼容性。

(7) 动力源。主机遥控系统的液压和气动设备, 应能在动力源压力变化额定值的±20% 时正常工作, 在设计压力值的 1.5 倍时不损坏。

(8) 电源。主机遥控系统应能按满足表 7.2-13 要求的电源电压和频率偏离额定值的波动条件下正常工作。

当电源的谐波成分不大于 5%时, 自动化系统应能正常工作。

表 7.2-13 电压和频率波动表电压				
设 备	参 数	稳 态 (%)	瞬 态	
			(%)	恢复时间(s)
一般交流设备	电压	+6~-10	±20	1.5
	频率	±5	±10	5
由直流发电机供电或经整流器供电的直流设备	电压	±10	—	—
	电压周期性波动	5	—	—
	纹波电压	10	—	—
由蓄电池供电的设备: 充电期间接于蓄电池者 充电期间不接于蓄电池者	电压	+30~-25	—	—
	电压	+20~-25	—	—

4.4 输入输出及接口标准

船舶主推进装置控制监测系统与被控对象及其辅助系

统、各类传感器之间的信号接口标准可分为以下几类:

4.4.1 开关量信号

开关量信号可分为有源触点、无源触点信号; 有源 OC 门、无源 OC 门信号; 电平、脉冲信号等。

有源信号是指信号的动力源(电源)由信号输出方提供, 无源信号是指信号的动力源(电源)由信号接受方提供。如控制系统控制主机的停车电磁阀、磁感应传感器等等。

触点信号是指通过继电器的常开、常闭触点, 按钮的按下、释放, 开关的断开、闭合产生的信号。如油门零位、桨角零位、离合器接合、离合器脱开等等。

OC 门信号是指由 TTL 集成电路产生的导通和截止信号, 一般来说驱动能力较小, 只有几十至几百毫安电流。

电平信号是指控制命令发出后产生信号并能保持该信号, 如继电器、带自锁的按钮、开关和软件控制产生的信号。

脉冲信号是指控制命令发出后产生的暂态信号, 该信号保持一定时间后消失, 如带有自复位的继电器和开关、不带锁按钮和软件控制产生的信号。

4.4.2 模拟量信号

模拟信号又可分为有源电压、无源电压信号; 有源电流、无源电流信号及电阻等。

有源信号是指信号的动力源(电源)由输出方提供, 无源信号是指信号的动力源(电源)由接受方提供。

电压信号是指供方输出的模拟量信号的电压幅值不随需方负载变化而变化, 即恒压信号。如桨角测量、温度测量等。电压信号分 mV(热电偶), 5V、10V 等。

热电偶一般用于高温(300~1000℃)温度测量。根据组成热电偶的材料不同, 分为 K 型、N 型、S 型、B 型、R 型、E 型。常用 K 型和 E 型热电偶测量柴油机排温。对于热电偶温度传感器, 使用中要注意冷端温度补偿和非线性修正。

电流信号是指供方输出的模拟量信号的电流幅值不随需方负载变化而化, 即恒流信号。如油门位置反馈信号, 压力变送器输出信号, 液位测量信号, 桨角测量信号等等。

压力变送器通常是 4~20mA 电流信号, 它有 2 线制和 4 线制两种连接方式。4 线制为测量电流回路和工作电源回路单独分开, 2 线制为工作电源回路串接在测量电流回路中。

电阻信号一般有热电阻和电位器等。

热电阻一般用于低温(0~500℃)温度测量, 根据电阻的材料不同, 分 Pt10 型、Pt100 型、Cu50 型、Cu100 型, 船上常用 Pt100 型热电阻。热电阻的阻值随周围温度变化而变化, 而测量的阻值也与测量线缆的物理特征有关。为保证测量精度, 需用相同的线缆进行线路补偿, 因此一般采用 3 线制。

电位器多用于位移测量。

4.4.3 脉冲频率信号

脉冲频率信号可分为有源 TTL 电平方波和无源磁电式交流脉冲信号, 由磁电式测速传感器产生, 用于测量主机、增压器及轴系的转速。磁电感应产生的交流脉冲经有源电路整形处理后再输出, 就变成了 TTL 电平方波信号。

4.4.4 串行通信信号

串行通信可分为高速工业以太网、现场总线网、RS485 串行通信、RS232 串行通信和电流环等。

现场总线是应用在生产现场, 在微型测量控制设备之

间,实现双向串行多节点数字通信的系统,也被称为开放式、数字化、多点通信的底层控制网络。

目前使用较多的现场总线有以下几种:

1) CAN: 最早由德国 BOSCH 公司推出,用于汽车内部测量与执行部件之间的数据通信。由于得到了摩托罗拉 (Motorola)、英特尔 (Intel)、飞利浦 (Philips)、NEC 等公司的支持,它被广泛应用在离散控制领域。

2) Lon works: 该总线所采用的 Lon Talk 协议被封装在称之为 Neuron 的神经元芯片中而得以实现。

3) Profibus: 由 Profibus-DP、Profibus-FMS、Profibus-PA 组成 Profibus 系列。

4) FF: 基金会现场总线,在过程自动化领域得到广泛支持。

目前,船舶常用的现场总线有 CAN、Profibus 和 RS485 串行通行等。

4.5 船舶主机遥控系统可靠性设计原则

船舶主机遥控系统可靠性设计主要涉及可靠性要求、可靠性模型、可靠性分配、可靠性预计和可靠性试验等方面问题。关于系统的可靠性设计,读者可以查阅专门的可靠性设计书籍,这里不做专门的理论论述,仅以通用实例说明主机遥控系统可靠性设计的一般方法。

4.5.1 可靠性要求

船舶主机遥控系统可靠性一般要满足以下要求:

平均无故障时间(MTBF)≥10 000h。

平均维修时间(MTTR)≤0.5h。

4.5.2 可靠性模型

要建立可靠性模型,首先要对控制系统进行可靠性分析,建立系统可靠性框图,得到可靠性数学模型。

假设某船的主机遥控系统又自动操作显示面板(AOP)、半自动操作板(SAOP)、遥控控制器(RCC)、柴油机控制器(DEC)以及齿轮箱/调距桨控制器(PCC)等组成。对于监测控制主推进装置运行任务剖面,遥控系统各单元模块为串并联结构,其系统可靠性框图如图 7.4-42 所示。

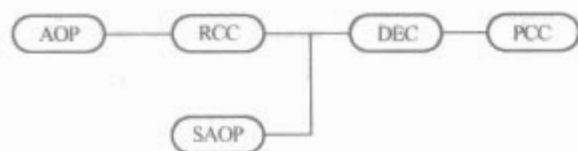


图 7.2-42 系统可靠性框图

系统中有 1 个自动操纵板 (AOP), 1 个遥控控制器 (RCC), 1 个半自动操纵板 (SAOP), 1 个柴油机控制器 (DEC) 和 1 个齿轮箱控制器 (PCC)。由可靠性框图可得可靠性模型的数学表达式

$$R_s(t) = \{1 - [1 - R_1(t) \cdot R_2(t)] \cdot [1 - R_3(t)]\} \cdot R_4(t) \cdot R_5(t) \quad (7.2-1)$$

式中: $R_s(t)$ 为遥控系统的可靠度; $R_1(t)$ 为 AOP 的可靠度; $R_1(t) = \exp(-\lambda_1 \cdot t)$; $R_2(t)$ 为 RCC 的可靠度; $R_2(t) = \exp(-\lambda_2 \cdot t)$; $R_3(t)$ 为 SAOP 的可靠度; $R_3(t) = \exp(-\lambda_3 \cdot t)$; $R_4(t)$ 为 DEC 的可靠度; $R_4(t) = \exp(-\lambda_4 \cdot t)$; $R_5(t)$ 为 PCC 的可靠度; $R_5(t) = \exp(-\lambda_5 \cdot t)$ 。

则

$$\begin{aligned} MTBF_s &= \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_s t} dt \\ &= 1/\lambda_s \end{aligned} \quad (7.2-2)$$

式中: λ_1 为 AOP 的失效率; λ_2 为 RCC 的失效率; λ_3 为 SAOP 的失效率; λ_4 为 DEC 的失效率; λ_5 为 PCC 的失效率; λ_s 为系统的失效率; MTBF 为产品的平均故障间隔时间。

4.5.3 可靠性分配

由可靠性理论知道:

串联系统的失效率为

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (7.2-3)$$

并联系统的失效率为

$$\lambda_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \lambda_i) \quad (7.2-4)$$

$$\frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (n=2 \text{ 时})$$

则上述主机遥控系统的失效率计算如下:

AOP 与 RCC 为串联结构其失效率 λ_A 为

$$\lambda_A = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (7.2-5)$$

AOP 与 RCC 串联后又与 SAOP 并联, 其失效率 λ_B 为

$$\frac{1}{\lambda_B} = \frac{1}{\lambda_A} + \frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_A + \lambda_3} \quad (7.2-6)$$

遥控系统的失效率 λ_S 为

$$\lambda_S = \lambda_B + \lambda_4 + \lambda_5 \quad (7.2-7)$$

采用工程加权法对遥控系统各部分运行可靠性指标进行分配, 加权因子 K_i 必须考虑如下因素:

复杂性因子 K_1 ; 关键性因子 K_2 ; 标准化因子 K_3 ; 环境因子 K_4 ; 元器件质量因子 K_5 。因此

$$K_i = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 \quad (7.2-8)$$

4.5.4 可靠性设计原则

在对主机遥控系统进行可靠性设计时, 一般可采取下列设计原则:

- 1) 降额设计, 对电源和数据采集单元等主要环节采用降额设计。
- 2) 防热设计, 尽量选用低功耗型芯片以降低工作时的温度, 结构考虑导热、散热措施。
- 3) 简化设计。系统采用高集成度的微处理器及可编程芯片取代复杂的功能电路, 提高了各设备的集成度及可靠性。
- 4) 采用先进、成熟、可靠的加工工艺, 保证产品的制造质量。
- 5) 控制、监测报警和安全保护相对独立。
- 6) 重要设备和功能冗余。
- 7) 控制软件经过测试。
- 8) 设备需要做环境例行试验, 验证其可靠性。
- 9) 系统做长期通电老化试验, 以检验系统早期故障率并排除其故障。

4.6 安全性设计

4.6.1 设计目标

对船舶主机遥控系统进行符合舰船使命任务的设备安全性设计的目标是, 使其在整个寿命期内消除那些可能对人员、设备的安全或环境造成危害的危险因素或危险源, 或将它们控制在其技术规格书及设计遵循的有关国标、军标及规

范允许的范围以内。

4.6.2 设计原则

进行设备安全性设计时一般应遵循以下几项原则：

- 1) 符合性原则：设计应满足有关规范、标准和技术规格书要求。危险风险指数不高于规定可接受的水平。
- 2) 安全第一原则：设计应优先采用具有最小风险的工艺、材料、元器件、技术和方案。系统的先进性、经济性、简便性一般应服从于系统的安全性。
- 3) 预防为主原则：应以预防危险的发生或预先将危险的严重程度降至最低为主要的技术手段。
- 4) 最小风险原则：应通过设计消除已经识别的危险源和危险因素，或尽可能将它们的风险减低至最小。
- 5) 逐级安全原则：通常按组件、分（子）系统、系统逐级进行安全性设计。
- 6) 危险分散原则：通常按危险分散原则设计。可使各分（子）系统、各物理区域相对独立，减少个别危险、局部危险对整个系统的影响程度。
- 7) 安全补偿原则：对于一般设计不能消除的危险或不能将危险减少到可接收的水平，应采取必要的安全补偿措施如联锁、后备、冗余、保护和报警等等。

4.6.3 安全性措施及优先次序

进行设备安全性设计时一般可采取以下措施（按优先次序排列）：

- 1) 最小风险设计：通过设计将风险消除或减少到规定的可接收水平。
- 2) 采取补偿措施：对一般设计不能满足安全性要求的危险，采取必要的补偿或后备措施，使危险降低到规定的可接受水平。
- 3) 提示和报警：对于设计和补偿措施都不能消除或有效控制危险，应采取提示或报警的方式。
- 4) 说明和培训：对与操作人员的操作程序、操作动作和管理制度有关的危险，则应在有关技术资料、文件和图纸中加以特别说明，并加强人员培训。

5 几种典型的船舶主机遥控系统

5.1 小型船舶主机遥控系统

小型船舶主机遥控系统可分为 3~4 种型式，即电控式、

电气混合式、纯气控式和钢丝绳直拉式。每一种有多种变化的式样，各厂商均有各种各样的设计，都有各自的优缺点，适应各种生产情况。这里介绍前 3 种型式。

5.1.1 电控式控制系统

图 7.2-43 是一种典型的遥控系统框图。

(1) 设备设置。在图 7.2-43 中，在驾驶室，集控室及机旁控制箱均有一个主机操控位置联络转换开关 F。利用此开关进行驾驶室，集控室，机旁控制箱（台）之间的联系，以决定何处操控主机。它们的优先级依次为机旁控制，集控室遥控，驾驶室遥控。此优先级是由轮机部门值班员根据主机工况性能的优劣决定。此主机操控位置联络转换开关在船上也称之为辅车钟。在自动化程度较高的船上（如无人机舱的船上），一般在驾驶室装配有既能进行传送车令信号，又能输出控制主机运转操纵信号的复合发令器 L。而在集控室配置回令器 H，在机旁箱（台）配置回令器 J。当然也有既在驾驶室配置复合车令发讯器，又在集控室配置复合车令发讯器的情况。如果船是少人值班机舱的模式，那么在集控室配置既能回令，又能输出控制主机运转的操纵信号的复合发令器。而驾驶室只需配置仅能发出车令的车令发讯器；机旁控制箱（台）一般只设置回令器 J。机旁控制箱上的回令器 J 一般是在主机工况较差时作回令用。回令后机舱值班人员就能直接手动操纵主机油门手柄或操纵薄膜阀（气动膜片执行器）BZ 的手柄，以调节主机转速。另外在机旁控制箱上还设有一车令显示板，以表示车令的传送情况。再有在电磁阀箱内按需要设有电磁阀、手柄、梭阀、手动调压阀等，以便机旁操作时使用。

(2) 基本控制过程。假设集控室设置的是复合车令发讯器，而驾驶室设置的是纯车令发讯器。一般情况下多数中小船舶主机都是手动气动，然后经过用位置控制联络开关 F 进行联络决定由集控室操纵主机。假设此时船舶主机已起动，船舶已在航行中。这时当驾驶室操作人员用车令发讯器 L 的手柄由原来的挡位推向另一挡位后，L 向集控室的控制单元输出一操作指令。控制单元在软件的判断下，向集控室的复合车令发讯器发出推向另一挡位的指令，此时在驾驶室及集控室内的蜂鸣器发出声响，机舱高分贝喇叭也发出声响，同时集控室的车令发讯器上的接受指令的指针转动指向新的挡位，在机旁箱上的车令显示板新挡位的灯光闪光。当集控室值班人员用复合车令发讯器

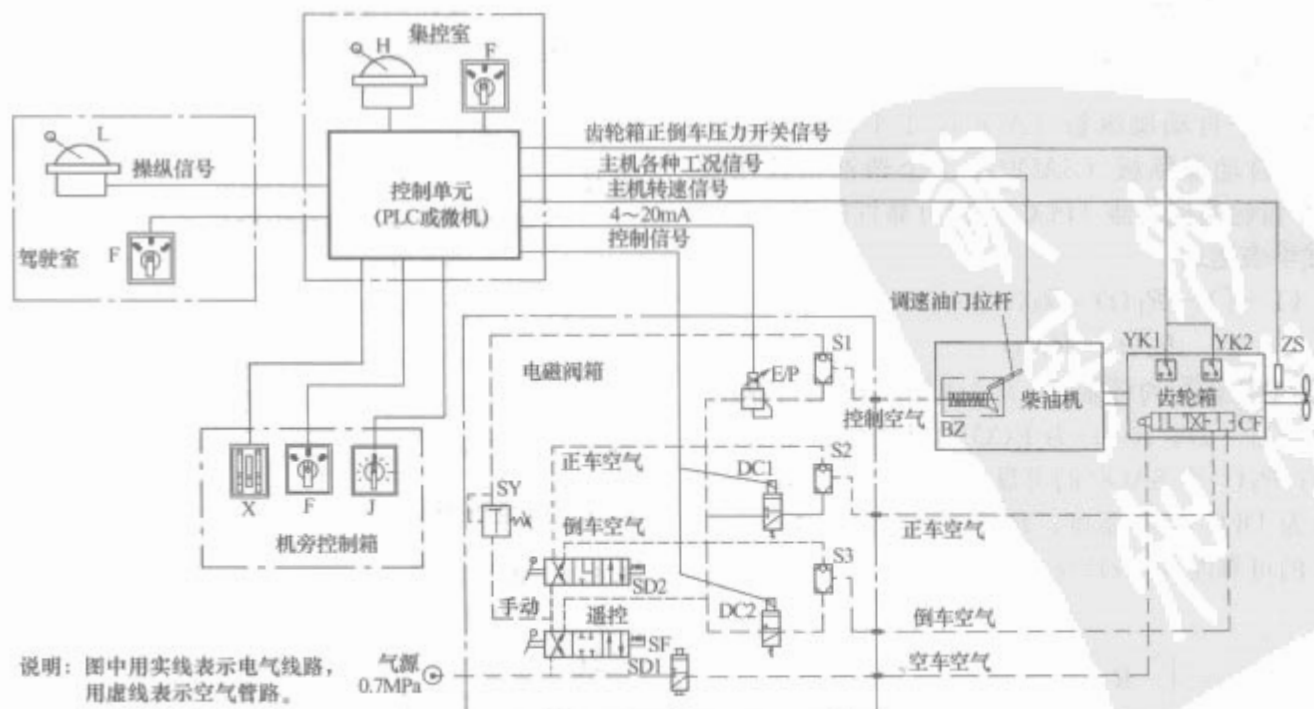


图 7.2-43 典型的遥控系统框图

回令，就是将复合操纵器的手柄位置由原挡位推向驾驶室送来的要推向的新挡位。此时控制单元向每个部件发出指令：①所有音响设备停止发出声音；②驾驶室车令发讯器回令指针转动指向新的挡位；③机旁控制箱车令显示板新挡位的指示灯变闪光为定光；④控制单元向 E/P 发送新的具有一定升降速率的电流信号，E/P 便随电流变化的速率而改变其输出的气压信号。主机上的执行机构 BZ 伸出轴的行程推动柴油主机油门拉杆到新的位置，改变柴油主机的转速；⑤如果新的挡位不要求改变船螺旋桨换向（即齿轮箱脱排和反向接排），则 DC1、DC2 保持原状态。如果螺旋桨换向，则控制单元发出电信号使主机转速降低到可以换向时（转速由转速传感器反馈给控制单元），DC1、DC2 两电磁阀中，其中有一个原来已是有电处于工作状态（假如 DC1 正车电磁阀有电，船舶向前进方向行驶），则 DC1 失电，进入齿轮箱的正车空气被两位三通阀（DC1）放入大气中，齿轮箱上 YK1 正车油压开关复位，并将复位信号反馈给控制单元，齿轮箱接着脱排，此时主机变为空车状态，主机转速由于空车而在一定程度上会升高一些，经过空车停留一定的时间（15s 以内，时间由控制单元程序设定或由艏轴转速决定），DC2 被控制单元通电，DC2 动作，齿轮箱立即获得倒车空气，并且进行倒车接排，于是船舶艏轴带着螺旋桨倒转，船舶后退行驶，完成船舶换向航行的动作。反之，船舶从倒车换到正车其动作刚好相反。如果船舶行驶时碰到风浪，螺旋桨由于露出水面而转速产生波动时（转速传感器提供），控制单元就自动对 E/P 进行 PID 调节，使主机转速尽可能保持稳定。主机滑油压力过低或冷却水温度过高等信号由主机带有的传感器将信号反馈给控制单元，由控制单元判断后控制 E/P，使主机自动降速，或控制主机停车电磁阀使主机停机。阀箱内由几个手控阀，其中三位四通阀 SD1 是气源控制阀，在图中 SD1 是处于左侧阀位，气源供给电磁阀，遥控用，中间阀位四个气口全部堵死，这阀位是手动/遥控的过渡位置，手动或遥控均保持原状，右边阀位是手动位置。当在右边阀位时，气源提供到三位四通阀 SD2 和手动调压阀 SY。而不向 DC1、DC2 和 E/P 提供气源，这表明要在机

旁操纵主机。SD2 是控制正倒车的手动阀，SD2 处于左侧阀位时，气源通过 SD2，梭阀 S3，再到齿轮箱 CF 的倒车空气输入口。SY 是手控调压阀，当调节 SY 时，其输出气压通过 S1 而达到 BZ，实现手控调节柴油机转速。图中 SF 是手控二位三通阀，它的作用可迅速排放接到齿轮箱控制气阀上的空车空气，使其迅速脱排。在阀箱内设置 SD1、SD2 及 SY 的目的是当系统发生任何电气故障而气源供气正常情况下，可在机旁阀箱上手动顺利操作主机工况。也有的厂商在机旁控制箱上装上了一个控制 DC1、DC2 正倒车电磁阀的转换开关（省去 SD1、SD2、和 S2、S3 等阀件），用于在机旁控制箱上操纵正倒车。

5.1.2 电/气混合式控制系统

图 7.2-44 是一种电/气混合式的小型船舶控制系统。

其设置和电控式不同的是，在驾控台设有一个车令发讯器 L，而在集控室设有一个复合车令发讯器。这个复合车令发讯器既有用电流信号来回答驾驶室从 L 发来的指令，又有能从装有一个精密调压阀那里输出相应压力的调速空气。当然也有将回令器和操纵器分开的形式。在电磁阀箱里二个 3/2 电磁阀 DC1 和 DC2，其作用和电控式一样。手动调压阀 SY 起两个作用，①用于在阀箱上可用手操纵调速空气；②在一般情况 SY 调在空车状态的气压，一旦当柴油机出现故障时，控制单元向 QF 发出指令接通电源，此时 QF 的 1 和 2 接通，由于 SY 处于空车状态，气压本来由节流阀流过来的高于 SY 的气压迅速降低，起到降速的作用，就是说混合型控制系统也有安全保护功能。如果有需要也可和电控式控制系统一样设置手动控制阀以便在机旁操纵主机的正倒车。混合式控制方式，其控制单元不能对主机转速进行 PID 调节。只能靠主机的开式液压调速器进行控制。

5.1.3 气控式遥控系统

图 7.2-45 是气控式遥控系统：气控式小型船舶控制系统框图。

气控式遥控系统有各种各样的设计，这些设计都是根据不同的船舶的要求，主机的不同等设计的，故各不相同。为

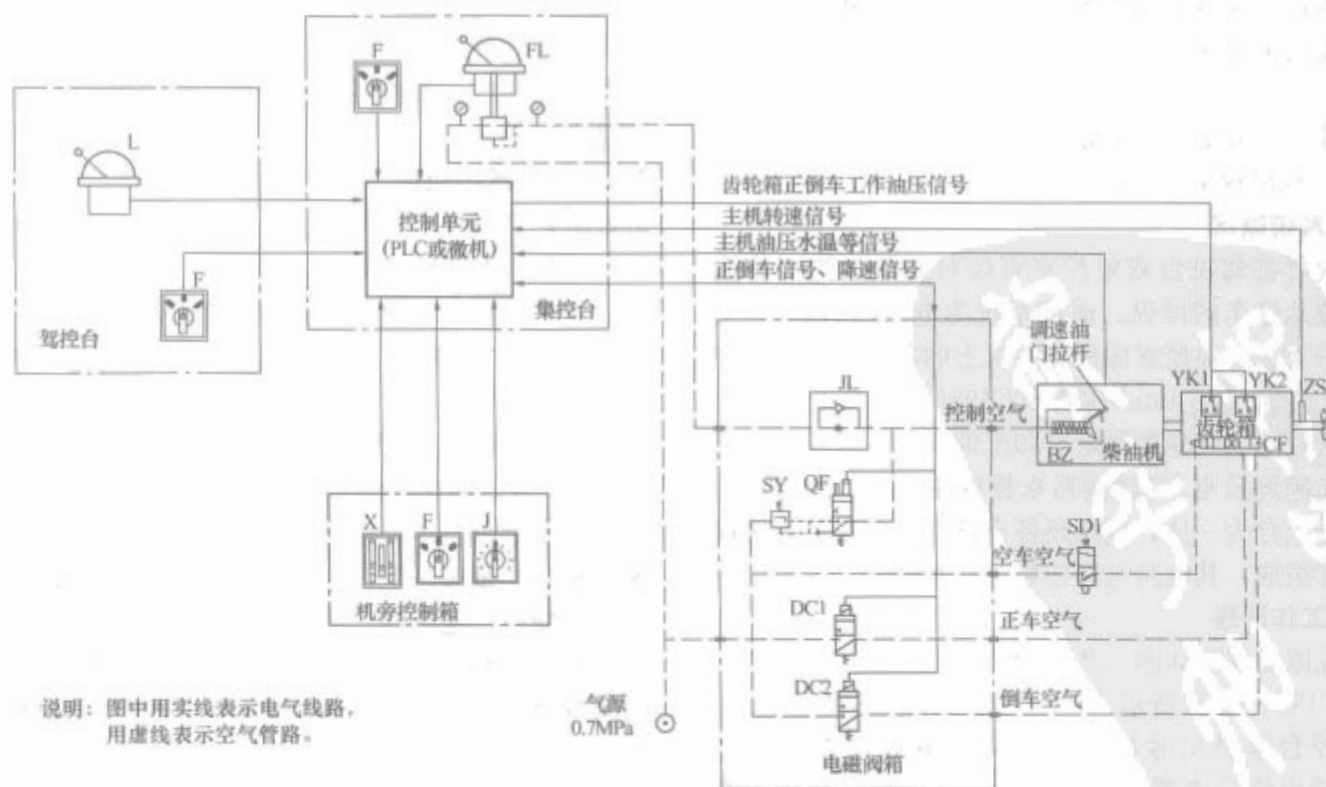


图 7.2-44 电/气混合式的小型船舶控制系统

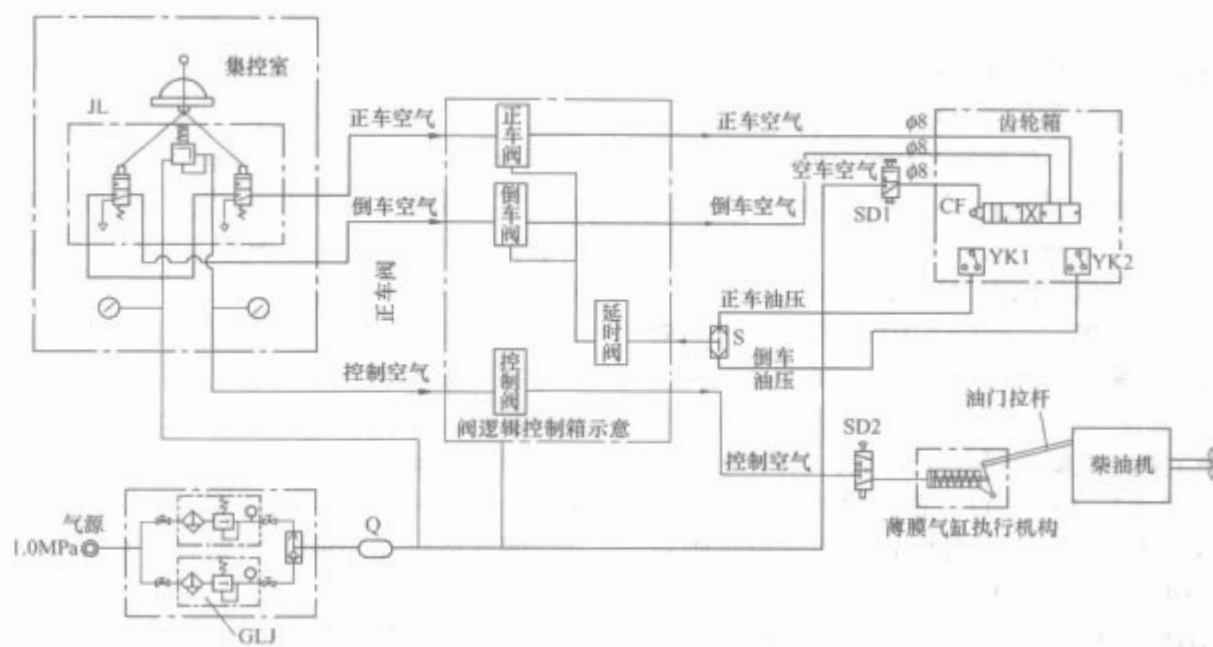


图 7.2-45 气控式小型船舶控制系统框图

简化,该框图中已略去了车令发令、回令的部分。在阀逻辑控制箱中的阀不全是专用气动逻辑控制元件,大部分阀件既是控制元件又是逻辑元件。如果将部分阀件改为电磁阀,将主机降速,停车等电信号直接去控制这些电磁阀,那么可以设计出除 PID 调节外的几乎和电控式一样功能的逻辑控制。看图 7.2-45 时,要注意进入逻辑控制箱的正车空气,倒车空气和控制空气和从箱内出来的正、倒车空气及控制空气已经在时间和速度上不一样,已经随正、倒车油压输入信号的变化而变化。

5.2 定距桨船舶主机遥控系统

定距桨是桨叶和桨毂固定成一体,桨叶的螺距在运行过程中是不能改变的。通常主机为二冲程低速大功率柴油机,这样的动力装置配置其主要优点是结构简单、工作可靠、在设计工况下效率高,因此为大多数民用商船所采用。有时主机采用中速柴油机,则配有减速齿轮箱。

定距桨船舶的缺点是对工况的变化适应性较差,工作点离设计工况越远,螺旋桨效率越低,因而不适合机动性要求高的船舶。要改善定距桨船舶的机动性,通常采用双机双桨的方法。

下面详细介绍某型定距桨船舶的主机遥控系统。其主机为 18EV390,双机双桨(定距桨)。

5.2.1 遥控系统概况

遥控系统可在驾驶台或集控室直接对主柴油机实施启动、停车、应急停车的操纵。遥控系统为电/气式调节,电信号由驾驶台面板、集控室面板和主机上的各传感器引入主微机控制箱。微机采用 Intel 系列 80C196KC 芯片及其他智能化芯片,用单片机实现逻辑运算和反馈调节,最后输出信号通向一组电磁阀及电/气转换器来操纵主机。车钟与遥控操纵器在机械上合为一体,其电路各自独立,付车钟由转换开关和指示灯组成,其电路与遥控系统相互独立。

5.2.2 基本工作原理

遥控系统原理框图如图 7.2-46 所示。

本系统 CPU 采用英特尔(Intel)公司 80C196KC 芯片。驾控台、集控台车钟信号送 CPU,同时测速反馈信号经 CPU 处理,输出信号送逻辑控制板,通过逻辑控制板控制阀箱内的电磁阀的开关,CPU 通过对设定转速和反馈转速的比较进行 PI 调节,并通过 D/A 将控制信号变成 4~20mA

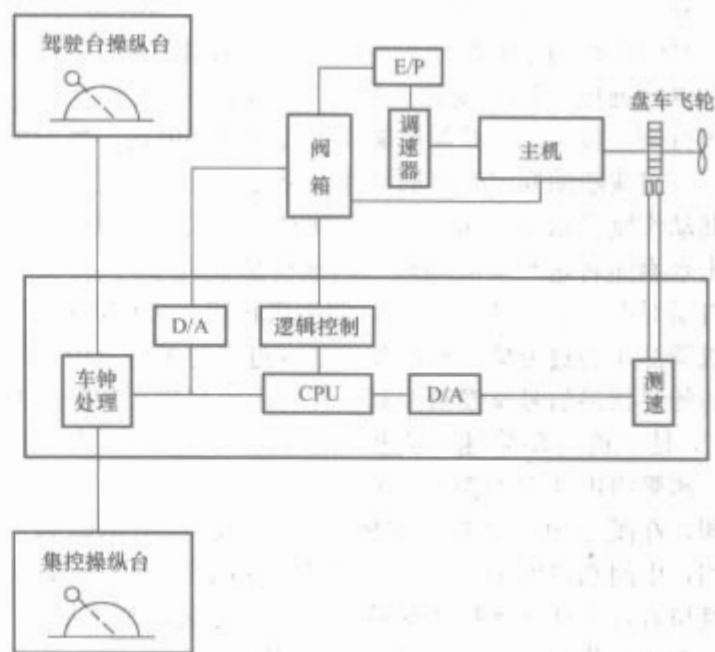


图 7.2-46 遥控系统原理框图

的电流信号送 E/P,有 E/P 去控制调速器,调节油门开度来调节主机转速。有些船为控制信号为 0~5V 电压信号,再送执行机构,如液压执行机构、印刷电动机(通常为电子调速器)等。

5.2.3 系统的组成

5.2.3.1 电源

系统有两种输入电源:交流 220V 和直流 24V。

正常情况下,遥控装置使用 220V 交流整流后的 24V 电源,交流 220V 失电,自动接通 24V 直流电,PC 机、显示器由 UPS 供电。

5.2.3.2 驾驶台操纵面板

(1) 左、右机遥控车钟各一只,车钟罩上标有正、倒车方向和车令分挡。车钟下方设有转速微调“降速”“升速”两只按钮,每按一下,主机设定转速加 1 转或减 1 转。进一时,不能往低速微调,进五时,不能往高速微调,微调最大值可至相邻两挡转速中间值。当车钟重新扳动时,微调设置的增减值自动取消。车钟在驾控、集控和机旁操车时,可用来发送车令。

(2) 车钟复示灯板,左右机各一块。用来指示驾控、集控车钟的车令。驾控时,驾控车钟指示单排对应灯亮,车钟每挡变化时,喇叭响 2s。集控时,两排指示灯分别指示驾

控车钟、集控车钟车令位置，两地车钟不一致，车钟喇叭一直响。

(3) 副车钟。副车钟用来指定控制位置联络。车钟复示灯板下方有副车钟位置及控制位置显示。当驾控、集控副车钟不一致时，灯闪、声响报警。

(4) 报警显示。驾控时，有起动联锁信号和报警指示，只要有任一个联锁信号存在，遥控不能起动。其中起动失败包括起动时间过长及起动三次失败。若有报警信号出现，相应的灯闪、声响，按试灯/应答按钮消声、平光。

报警显示系统，设有数码管调光及发光管调光单元。

(5) 应急车钟及应急按钮。应急车钟直接通过电缆与机旁应急车钟连接，钟面上圆灯指示机旁车钟位置，驾驶台、机旁应急车钟不一致时，车钟喇叭响。

驾驶台、集控室面板上设有应急操纵盒，应急按钮在应急操纵盒里。

1) 应急停车按钮。用于紧急情况停车。只要遥控控制空气压力正常，无论机旁或遥控操车，按下“应急停车”按钮即可应急停车。再按一下，可使按钮复位，以保证主机允许下次起动。

2) 紧急操纵。按下紧急操纵按钮，可越控起动失败信号及负载程序，起动主机。

3) 复位。每当紧急停车出现，故障排除后，按一下“复位”按钮，才允许主机重新起动。

每次刚上电时，首先要按“复位”按钮。

5.2.3.3 集控室操纵面板

(1) 遥控单元（包括应急按钮）。用来指示遥控起动过程及运行报警指示，键盘用于调试参数设定，模拟车钟转速用于模拟试验。应急按钮功能同驾控。

(2) 主车钟。功能同驾控车钟，升速、减速微调按钮功能同驾控。

(3) 副车钟。功能同驾控。

(4) 车钟复示器。具有显示驾控、集控主车钟的车令功能。

(5) 泵控开关。左、右机各有泵控运行、停止按钮及灯光指示。

(6) 报警显示。左右微机各一台 CRT 及报警灯板，实时显示各种压力、温度等，一旦所测参数越限，CRT 上参数颜色变化，喇叭叫，相应报警灯闪烁。

按“应答”按钮消声。

5.2.3.4 机旁装置

(1) 遥控/机旁转换阀。遥控/机旁转换阀手柄置“机旁”和“遥控”位置时，分别实现对主机机旁控制和遥控控制。

(2) 数据测量箱。

(3) E/P（电/气比例阀）。

(4) 执行气缸。

5.2.3.5 主控制箱及阀箱

(1) 主控制箱（如图 7.2-47 所示）。在集控台遥控面板下方有遥控主控制箱。遥控主控制箱完成车钟转速信号采

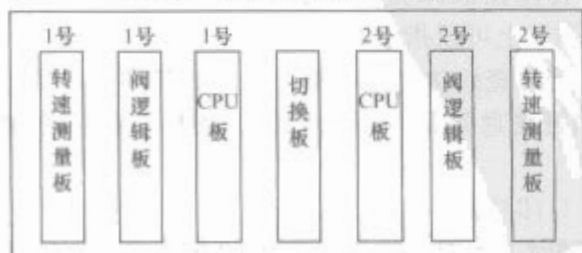


图 7.2-47 主控制箱

集，输出信号开关阀、调节油门等功能。它主要有七块板组成，如上图示。左面 3 块电路板组成遥控 1 号系统，右面 3 块电路板组成遥控 2 号系统，中间的切换板实现 1 号和 2 号遥控的切换。

转速测量板：主要完成转速信号采集、处理，车钟信号采集、处理及输出 4~20mA 电流信号给“E/P”电/气比例阀等功能。转速信号由转速传感器（安装在飞轮旁）采集，产生的正弦波模拟信号经处理变成数字脉冲信号，送给 CPU 板。车钟信号由主车钟给定，经处理送给 CPU 板，由 CPU 板的程序，调节控制。

阀逻辑板：主要完成起动阀、停车阀、应急停车阀等的逻辑时序控制，输出电信号给阀箱，控制电磁阀动作。

(2) 阀箱。阀箱由起动、停车、应急停车电磁阀及各种逻辑阀等组成，注意：只要遥控空气送上，遥控装置上电，应急停车电磁阀即可受控动作。即使此时遥控/机旁转换阀手柄位置在机旁，驾控台及集控台的应急停车按钮按下，就可使主机停车。

5.2.3.6 气源及执行机构

(1) 气源。由低压气瓶提供一路 0.7~0.75MPa 干燥清洁的控制空气给遥控。当集控台控制空气压力表指示值低于额定值时，则机旁操纵面板、驾控、集控面板均有报警，遥控不能使用。

(2) 执行机构。遥控系统通过输出 4~20mA 变化信号电流，使 E/P 输出气压变化，送给执行气缸。

当遥控/机旁手柄扳至机旁时，机旁机械调速器可操纵主机。

5.2.3.7 监测系统

(1) 传感器。压力传感器，测压力（气体和液体的压力）；铂电阻传感器，测低温（轴承和液体的温度）；热电偶传感器，测高温（气缸的温度）；常开常闭触头，测开关量（液位、压力开关状态等）。

(2) 测量箱。左、右机测量箱，中置系统测量箱，左右排温巡显测量箱，共五只测量箱。

(3) 监控微机。集控室两台微机。

(4) 打印机。用来报警打印的打印机放在集控台里。

5.2.3.8 结构特点和布置情况

集控台整体结构满足防滴（IP32）要求，面板倾斜度后仰 7.5°，台板倾斜度前倾 5°，保证观察视野。台体两侧开门，板前维修，台体无后门。台体下端设计有减振装置和防鼠板。

集控台布置在集控室里，各测量箱和气路阀箱以及机旁操作装置布置在机舱里。

5.2.4 主要功能和特性

5.2.4.1 起动

本装置可在驾驶台或集控室通过车钟于手柄遥控起动主机。

遥控操车时，需遥控/机旁手柄扳至遥控位置，机旁手柄转至油门最大位置，遥控空气正常，机旁付车钟转至集控或驾控。泵控开关转至自动，等遥控操车条件完成。下面以集控为例说明起动过程。

(1) 正常起动。车钟在集控位置，控制面板上，控制位置灯亮，当没有起动联锁信号，三次起动失败，起动时间过长，集控信号、集控车钟发出正车（或倒车）给定信号，面板上正车给定灯亮，正车阀、起动阀灯亮，起动电磁阀动作，起动空气开始吹车。当主机达到起动转速，停车阀关，主机喷油发火，起动阀自动关闭，主机正常运行，面板上正

车运行灯亮。

(2) 起动联锁。当有下列任一条件, 主机即起动联锁, 不能起动, 控制面板上相应的红灯亮。

烟囱盖关闭 (限位开关信号, 装在烟囱盖旁)。

盘车机啮合 (限位开关信号, 装在盘车机扳动手柄旁)。

主滑油低压 (压力控制器开关量信号, 压力 $< 0.2\text{MPa}$ 联锁)。

艏轴密封 (压力控制器开关量信号)。

刹车未脱开 (压力控制器开关量信号)。

有“应急停车”信号 (刚上电时可按复位键使之复位)。

(3) 起动时间过长。当起动电磁阀开起 $4\sim 10\text{s}$ (可调), 由于换向故障或起动空气系统等故障, 主机一直达不到起动转速, 则“起动时间过长”灯亮, 起动阀关, 停车阀开, 自动终止起动。这需要手柄停车复位后才能重新起动。

(4) 三次自动重复起动与重起动。第一次起动后, 主机转速已达到发火转速, 起动电磁阀也已关闭, 切断起动空气。后因发火不良而造成起动失败时, 系统自动发出“一次起动失败”信号, 控制面板上灯亮, 系统自动重复起动 (即第二次起动), 若第二次起动失败, 控制面板上“二次起动失败”灯亮, 并自动进行第三次起动。为了使第三次起动成功, 第三次起动时, 加大了起动油量。若第三次起动仍失败, 则系统发出“三次起动失败”信号, 控制面板灯亮, 并自动终止起动, 若要重新起动, 车钟手柄需停车复位后, 方可重新起动。

起动时间过长或三次起动失败, 在驾控或机旁面板都是显示起动失败。

5.2.4.2 停车

1) 正常停车。当驾控时驾控车钟手柄, 集控时, 集控车钟手柄拉至“停车”位置时, 停车电磁阀动作, 主机断油停机。

2) 紧急停车。出现紧急情况时, 只要按下“紧急停车”按钮, 紧急停车, 电磁阀动作, 主机立即断油停机。若要重新开机, 需将车钟手柄扳至“停车”位置, 再取消“紧急停车”, 再按一下即可。

3) 故障停车。当出现主滑油失电压低于 0.2MPa , 超速大于 530r/min , 主推力轴承高温大于 85°C , 主轴承高温大于 85°C 等紧急故障时, 系统自动发出“故障停车”信号, 紧急停车电磁阀动作, 主机立即断油停车。同时声光报警, 需按应答键消声。若要重新开机, 需将车钟手柄扳至停车位置, 排除故障后, 再按一下复位按钮, 方可重新起动。

5.2.4.3 调速

主机转速设定由车钟手柄实现, 正车进一至进五, 倒车退一至退三。每挡均可通过微调按钮进行转速微调。进一 (或退一) 不能往下微调, 进五 (或退三) 不能往上微调。微调最高至两中间值, 车钟手柄重新扳动时, 微调值自动取消。

每挡设定转速, 由程序 PID 控制调速, 转速设定信号经 E/P 至长气动执行机构, 调节油门来调速。

5.2.4.4 安全保护

为保证主机安全运行, 本装置设有如下安全保护功能:

1) 临界区转速避开。本装置设有自动避开临界区转速功能, 在临界转速区时, 升速时系统自动保持主机转速在临界转速下限; 在降速时, 系统自动保持主机转速在临界转速上限; 当转速设定值越过临界转速区时, 主机转速会自动迅速越过临界转速区, 如图 7.2-48 所示。

2) 故障降速。当出现下述情况之一时, 安全装置发出故障降速信号, 控制面板相应灯亮, 喇叭响, 按应答消声,

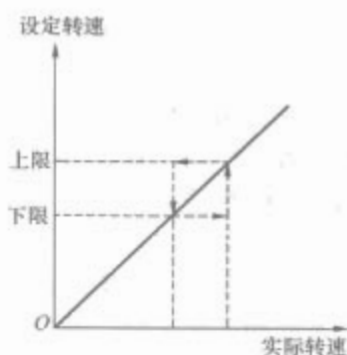


图 7.2-48 临界区转速曲线

主机转速自动降至进二 (290r/min)。

主机滑油压力过低: 0.21MPa 。

主机滑油高温: 大于 75°C 。

主机淡水高温: 大于 85°C 。

主轴承高温: 大于 82°C 。

主推力轴承高温: 大于 80°C 。

任一气缸排温: 大于 480°C , 平均排温大于 450°C 。

扫气箱高温: 大于 55°C 。

双机工作时: 大于 300r/min , 一台主机因故障停车, 另一台自动降至进二。

3) 紧急操纵。故障降速时, 按紧急操纵可取消故障降速, 当主机转速大于 300r/min , 主机进入负载程序区, 慢加速, 按紧急操纵, 可取消负载程序。

5.2.4.5 刹车

遥控刹车有两个必备条件: ①要断油, 断油限位开关安装在油门杆上; ②转速要低于刹车转速 $< 200\text{r/min}$ 。在遥控面板上相应灯会亮。

当车钟手柄扳至刹车位, 刹车给定灯亮, 两个条件满足。刹车阀动作, 遥控刹车。车钟扳至停车位时, 刹车松开。

5.2.4.6 自检

系统设有自检功能, 在控制箱 CPU 板上有两个灯。靠里面的灯监视 CPU 工作状态。常亮表示 CPU 工作正常, 一闪一闪或不亮表示 CPU 板有故障。

靠外面的灯监视通信工作状态。一闪一闪表示通信工作正常, 常亮或不亮表示通信故障。

5.2.4.7 监测系统功能

(1) 显示功能。

1) 动态显示所有测点的实测数据、显示内容包括测点的中文名称、单位、上限、下限、实测值等信息。

2) 主机排温直条图、主机模拟图等。

(2) 磁记录功能。

1) 对所有测点的测量数据每到整点可自动记录一次。

2) 对所有测点的报警及消警信息自动记录。

(3) 测点越限报警功能。

1) 当测点参数超过规定的值时, 此时该测点处于报警状态, CRT 上发出报警。

2) 对所有的报警点可汇集在一起, 进行集中显示。

(4) 传感器故障自检功能。当模拟量的传感器出现故障, 在 CRT 上可以指示。

(5) 记录查询功能。对整点记录的各测点参数, 测点的报警、消警信息等记录下的数据、图形, 都可方便地进行查询。

(6) 打印功能。

1) 随时人为召唤打印各测点的参数或选页打印所需测点的信息。

2) 自动打印测点报警和消警信息。

3) 打印记录下的历史数据。

(7) 故障自诊断功能。系统可以对整个主机遥控监测系统的设备状态及通信网络进行故障自诊断, 诊断出系统各个节点的工作是否正常, 出现异常时, 提供简单的解决方法。

5.3 调距桨船舶主机遥控系统

调距桨推进装置在全部设计工况下, 通过调整螺旋桨的螺距比和主机转速的关系, 都可以获得推进装置的较高效率, 可以实现各种航速和船舶换向, 其操纵过程简单迅速, 使船舶具有很高的机动性。

5.3.1 调距桨主机遥控系统控制方式

(1) 机桨控制方式。调距桨船舶主机遥控系统的控制方式主要有以下三种。

1) 以调距为主。保持主机运转转速不变, 航速由螺距的变化来调节。这类船型最多, 特别是采用轴带发电机组的船舶。

2) 以调机为主。大部分工况下保持螺旋桨螺距不变, 航速由主机转速的变化来调节, 变距桨主要用于船舶换向。这类控制方式基本上只有军船使用。

3) 机桨匹配联动。在船舶航行中, 以某一控制目标为最优, 自动追踪最佳的机桨匹配, 同时调节主机转速和螺旋桨螺距。

前两种控制方式只是第三种方式的特例, 故下面所说的调距桨主机遥控系统是指变速变螺距的控制系统。

(2) 操纵方式。

1) 机桨联控。机桨联合控制是指用单操纵手柄同时控制调距桨的螺距和主机的转速。遥控系统接收操纵手柄发出控制命令后, 根据预先设定的调距桨螺距和主机转速联动曲线, 经过控制程序处理, 分别送出螺距给定信号和转速给定信号到螺距控制装置和转速控制装置, 实现调距桨螺距和主机转速的自动联合控制目的。

2) 机桨分控。遥控系统分别接收操作人员给定的调距桨螺距和主机转速信号, 并将给定信号分别送给螺距控制装置和转速控制装置, 实现调距桨螺距和主机转速的分别控制目的, 此时机桨配合关系由操作人员决定。

5.3.2 调距桨主机遥控系统应用实例

图 7.2-49 是调距桨主机遥控系统控制原理图。控制系统采用以 80 196kc 微处理器为核心的控制器, 在自动操作模式下, 可实现机桨联控功能; 在半自动操作模式下, 可实现机桨分控功能。

这是一个以主机遥控系统为主的组合应用实例。主机遥控系统通过齿轮箱/调距桨控制器向调距桨控制系统输出给定桨角。系统的工作过程如下:

(1) 自动操作模式 (机桨联控)。

1) 遥控系统根据操纵手柄位置确定车令 (前进五、前进四、前进三、前进二、前进一、空车、后退一、后退二、后退三)。

2) 遥控系统根据选择的运行方式 (如单双机正常运行模式、静音模式、单轴模式、港内航行模式等), 查询预先设定的优化机桨匹配曲线, 确定该车令下的螺距控制目标值和转速控制目标值, 并把该控制目标指令分别下发到调距桨控制器和柴油机控制器。

3) 柴油机控制器根据转速控制目标, 执行负载程序控制, 输出转速给定信号, 至转速调节控制器。转速调节器根据实际转速偏差, 经 PID 运算, 控制燃油杆位置, 调节主

机供油量, 保持主机转速稳定。

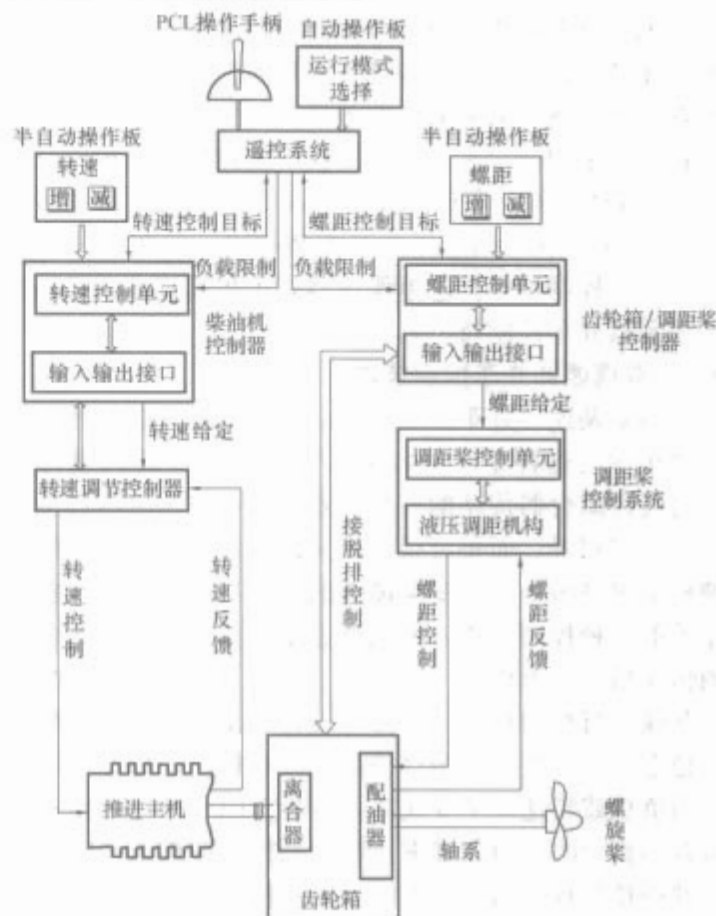


图 7.2-49 调距桨主机遥控系统的原理图

4) 螺距控制器根据桨角控制目标, 执行负载程序控制, 输出桨角给定信号至调距桨控制系统。调距桨控制系统根据实际桨角偏差, 经 PID 运算, 控制液压调距机构调节桨叶的角度, 保持桨角稳定。

(2) 半自动操作模式 (机桨分控)。螺距控制器和柴油机控制器分别接收操作人员手动发出的螺距增减和主机转速增减信号。经过各自控制程序计算处理后, 分别输出转速给定信号和桨角给定信号。机桨分控模式下, 机桨匹配关系由操作人员确定。为防止在半自动方式下主机加速时超载, 减载时超速以及调距桨在高速区改变螺距时易发生调距机构超负载等不利情况, 人工操作应采用如下的控制方式: 一般在低速区可先改变螺距后改变转速; 在高速区先改变转速后改变螺距。

5.4 双机并车船舶主机遥控系统

柴油机动力装置因其良好的全寿命效费比、机动性、在中小功率范围内优异的质量尺寸比以及较成熟的制造技术等优势, 是中、小型船舶的主要动力形式。由于中高速大功率柴油机的单机功率一般为 5000~7500kW, 常常不能满足较大船舶对推进功率的需求。用两台或多台柴油机通过弹性联轴节、并车齿轮箱 (带离合器或液力偶合器), 联合驱动一根螺旋桨轴。这样的船舶主推进装置配置, 可满足多种船舶不同技术性能的要求。更能提高主动力装置的寿命、全寿命效费比和生命力, 是目前中等发达国家和发展中国家舰船较理想的动力形式之一。

多机并车船舶主机遥控系统, 既有别于一般单机单桨的主机遥控系统, 也有别于并网运行电站机组的控制系统。由于主机并车一般采用离合器接合/脱开方式实现, 没有缓冲环节, 因此负载的均衡波动及对主机功率的影响都较直接而快速。其中的关键技术是主机并车/解列过程控制, 负载分配转移过程控制以及根据操作部位以及在各种工况下保持并车柴油机输出功率的均衡或按优化比例分配。为此, 工程技

术人员一直在探索和研究各种各样的船舶主机并车功率均衡控制技术。目前国内已有多艘船舶使用双机并车动力装置。这些船舶使用的双机并车控制技术从实验室试验和实船运行情况看,已收到较满意的控制效果。

目前常采用的双机并车控制技术按控制原理可以归纳为4种:①双调速器并车控制技术(或称并列调速器并车控制技术);②主、从式调速器并车控制技术;③功率反馈调速器并车运行控制技术;④单调速器并车控制技术(或称功率平衡控制器并车控制技术)。

5.4.1 双调速器并车控制技术

所谓双调速器并车控制技术,就是两台并联运行的柴油机在并车运行过程中,每台柴油机均按各自的调速特性运行。对经过离合器传动的并车装置而言,并车时两台柴油机的转速一定相等,而每台柴油机又都按各自的调速特性调整柴油机的供油量,以改变柴油机的输出功率。这是双机并车最原始的一种控制方式,控制器也很简单,只要使两台柴油机的转速给定信号保持一致即可。在这种并车控制方式中,两台并联运行柴油机的功率分配是否均衡,取决于两机调速器的稳态不均匀度。当两台柴油机具有相同的稳态不均匀度时,当负载或转速发生变化时,理论上两台柴油机能自动保持负载均衡分配。但若要求两台柴油机功率按某一比例分配时,就很难实现。而实际上两台柴油机调速器的稳态不均匀度很难做到完全相同,因此功率也无法控制均衡。另外,由于调速器的调节特性一般也存在非线性,当转速变化范围较大时,也加大了这种功率分配的不均匀性。因此,这种控制方式很少用在主机并车装置中。

双调速器并车控制原理图如图7.2-50所示。

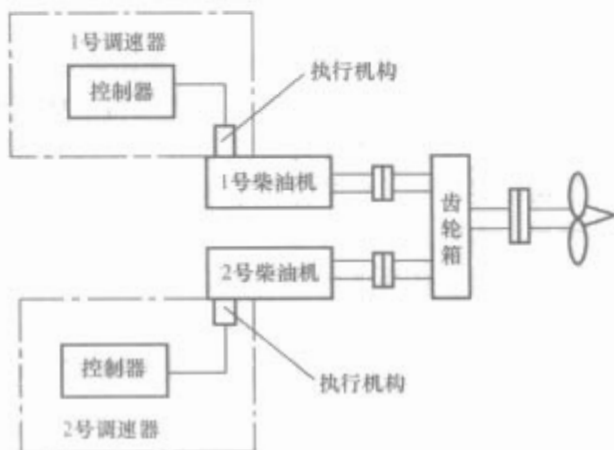


图 7.2-50 双调速器并车控制原理图

5.4.2 主、从式调速器并车控制技术

主、从式调速器控制技术的控制思路是:选择并车柴油机中的任意一台作为主动柴油机,它的调速器作主动调速器,该调速器在并车运行中对转速控制起主要作用;另一台柴油机作为从动柴油机,对应的调速器为从动调速器,在并车运行过程中,主调速器的工作情况同单机运行相同;而从调速器必须根据主调速器输出的油门位置与自身调速器输出的油门位置的差异来修正从调速器的转速给定值,以达到双机功率平衡(或所希望的功率分配比)。此时,两台调速器的给定值是不相同的。其控制原理框图如图7.2-51所示。

此种控制方式在国内民用船舶中已得到应用。这些民用船舶一般在800~1000t级,操纵控制系统的动力源为压缩空气,其气动元件如负载平衡阀、控制执行阀、单向调节阀等一般都具有惯性,此外这种控制方法从理论上分析,从动调速器的控制较之主动调速器必然有一定的控制滞后。因此,这种控制方式的稳态性能一般能满足并车的需要,即

能把两台柴油机的功率不均衡控制在一定范围,但其动态性能较差。

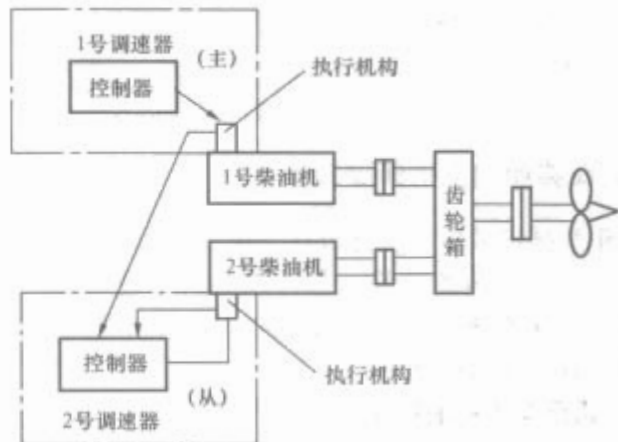


图 7.2-51 主、从式调速器并车控制原理图

5.4.3 功率反馈调速器并车运行控制技术

功率反馈调速器并车控制技术原理:两台调速器的给定转速都需要按两台柴油机的油门位置差异来修正。每台柴油机本身都带有一个调速器。每台柴油机都需增配一套柴油机油门位置测量机构,并将该信号反馈给两台调速器。原理框图如图7.2-52所示。其优点是工作稳定性及功率不平衡性比双调速器并车控制技术有所改善。与主从调速器法相比,工作稳定性差不多,功率平衡性稍有改善。但对调速器的要求则比较低。缺点是机构较为复杂,参数整定也比主从调速器法要求高,若参数整定不好,其工作稳定性及功率不平衡性都会不及主从调速器法。

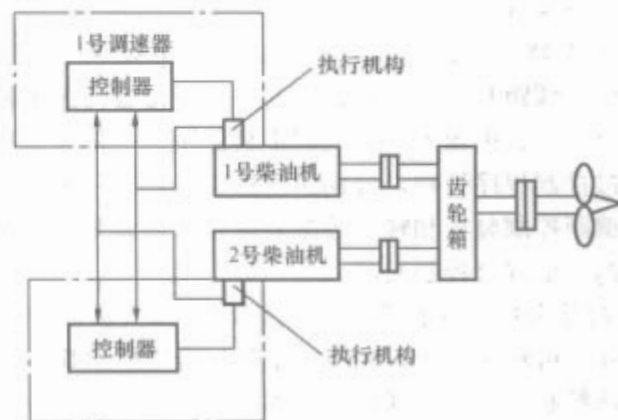


图 7.2-52 功率反馈调速器并车运行

5.4.4 单调速器并车运行控制技术

上述3种柴油机并车运行控制技术虽能实际应用,但尚未达到人们的理想要求。特别是对于大功率的柴油机,人们更希望有一个比较简单、可靠且性能满意的并车控制技术。单调速器控制技术是近几年来随着电子调速器在舰船主机上的应用而发展起来的一种控制技术。在并车运行过程中,两台并联运行的柴油机共用一个控制器(调速器),因此称为单调速器控制法。其控制原理框图如图7.2-53所示。

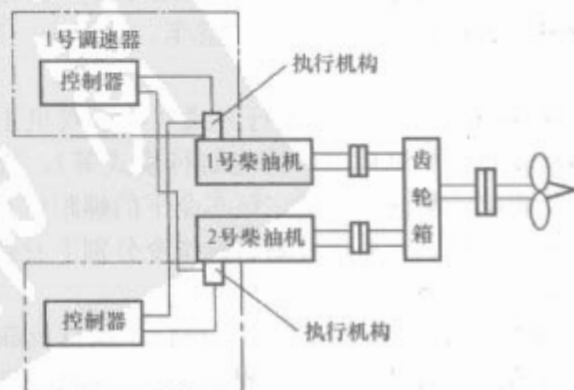


图 7.2-53 单调速器多柴油机并车运行

单调速器多柴油机并车运行控制技术方案（以双柴油机为例）如下：

（1）每台柴油机单独配一台调速执行机构。

（2）两台柴油机共用一个具有两套控制模块的调速器控制器。

两台柴油机分别单独运行时，1号调速控制模块与2号调速控制模块互不相干，与两台普通调速器运行方式完全相同。当两台柴油机并联运行时，两台调速控制模块中的任一台，仍像普通调速器一样，执行转速闭环控制程序。由于两台主机的转速是一样的，因而另一台控制模块放弃转速控制，转而进行功率控制，保持两台柴油主机的输出功率一致（或按一定比例）。显而易见，这时两台柴油机的功率均衡控制是开环控制，其功率均衡的控制精度靠高精度的调速器执行机构来实现。为使齿条位移控制准确，执行机构自身具有定位闭环控制功能，确保位移控制满足功率均衡控制要求。单调速器控制法假设两台柴油机的齿条位移值与功率输出值的对应关系是确定的（并不要求一致），这在实际中是容易测出的。与主、从式调速器控制技术相比，这种控制技术并不力求使并车柴油机的供油量相等，而是力求使并车柴油机的输出功率相等。它的控制基础是各并车主机的油门—功率曲线。考虑到每台主机的特性差异，它使用由柴油机生产厂商给出或者由实际测出的每台柴油机的油门—功率曲线。根

据功率均等（或按比例）的原则，控制器根据事先存储的各并车主机的油门—功率曲线，换算并输出进行功率控制的柴油机齿条位移给定值，从而保持两台柴油机的输出功率相等。

由于单调速器控制技术在控制过程中考虑了每台机的油门—功率关系曲线，因此具有以下几个优点：①适用于异型或不同功率柴油机之间的并车控制；②可实现按比例分配功率的功能；③当柴油机运行一段时间后，性能参数发生较大变化时，两机功率不平衡的程度也将变大，只要及时测定并修改柴油机的油门—功率曲线，仍可达到满意的控制效果；④控制信号同时发送给两台柴油机的执行机构，无主、从动关系，因此系统的动态性能和稳态性能都比较满意。

采用单调速器控制技术时，两台柴油机在接排前和脱排后仍为单机单控方式。因此，在接排时就有有一个由双调速器控制向单调速器控制的过渡过程；同样，在脱排时也有一个由单调速器控制向双调速器控制的过渡过程。接/脱排过程控制、负载转移过程控制及调速控制方式转变都关系到主机并车控制效果。在遥控系统设计中应反复测试验证，并需实船调整修正。

单调速器控制技术目前已被应用于某型舰船主动力监控系统中。



第 3 章 船舶机舱自动化

1 船舶机舱自动化的基本结构与要求

1.1 船舶机舱自动化的基本结构

机舱内有很多自动控制系统,既有闭环的,也有开环的。其中对运行参数进行自动控制的都属于闭环控制系统,如对温度、压力、液位、黏度等参数的自动控制,为使它们能始终处于最佳值,而对一些辅助设备运行的自动控制则属于开环控制,例如,分油机分油及排渣的时序控制、油水分离器的自动检测和控制、泵的自动切换等。本节重点介绍柴油机冷却水温度控制系统、燃油黏度自动控制系统、自清过滤器的自动控制系统等。

柴油机在运行时,气缸套和气缸盖必须采用淡水来冷却,冷却水的温度应保持在给定值附近。这对柴油机安全、可靠、经济地运行是十分重要的。气缸冷却水温度控制的方法是把冷却水分成两部分:一部分通过淡水冷却器,经海水冷却使水温降低;另一部分不通过淡水冷却器,直接与经过冷却的淡水相混合,然后进入柴油机气缸的冷却空间。若冷却水温度偏高,则需要减少不通过冷却器的旁通冷却水量,而增加通过冷却器的淡水量;反之亦然,以此来控制柴油机气缸冷却水的温度。

为了保证柴油机主机能正常运行,燃油的黏度必须保持在一个合适的范围内,如对低速柴油机,一般要求不超过 60~100cSt。若燃油黏度超过规定限度时,它可能会导致燃油系统中某些部件的损坏和管路接头漏油,同时使燃油雾化不良,燃烧效率低及柴油机运动件磨损加剧等。但也不是黏度越低就越好,对重油来说,黏度越低,加热温度就应越高,它在油泵吸入过程中有可能气化,这是必须避免的。为此对每种燃油也都相应地规定了最高加热温度。

现代自动化船舶上广泛应用的自清过滤器主要有两种清洗形式:气体辅助自动反冲洗过滤器和自身液流自动反冲洗过滤器。两种自清过滤器都能在不中断过滤运行的情况下进行自动反清洗,可保证滤液的连续供给。

船舶用分油机一般分为重油分油机和滑油分油机,两者普遍应用于自动控制系统,通过检测经分离过的净油中的水分含量,来控制分油机的排水阀和排渣阀的正确起闭,控制相应的声光报警和机械故障停机。

1.2 船舶机舱自动化的基本要求

1.2.1 一般要求

(1) 自动化系统应能在表 7.3-1 所述环境空气温度下正常工作。

表 7.3-1 环境空气温度	
安 装 位 置	温 度 (℃)
一般围蔽处所和有空调的围蔽处所	5~55
有散热设备且无空调的围蔽处所	5~70
开敞甲板、无保温措施的甲板室	-25~70

(2) 自动化系统应能在下列相对湿度下正常工作:

温度 45℃时: 95%±3%;

温度高于 45℃时: 70%±3%。

(3) 自动化系统应能在表 7.3-2 所示振动条件下正常工作,如果在下述频率范围内发生共振,当振动超过下述要求值时,应采取适当措施予以抑制。

表 7.3-2 振 动 条 件		
安 装 位 置	振 动 参 数	
一般处所	2.0~13.2Hz 振幅±1mm	13.2~100Hz 加速度±0.7g
往复机械上(例如柴油机、空压机上)及其他类似处所	2.0~25Hz 振幅±1.6mm	25~100Hz 加速度±4.0g
其他特殊部位,例如柴油机(特别是中、高速柴油机)的排气管上	40~2000Hz 加速度±10.0g(温度 600℃)	

(4) 自动化系统应能在各方向倾斜及摇摆 22.5°(周期 10s)以及垂直方向线性加速度±9.8m/s²时正常工作。

(5) 自动化系统应能适应船上盐雾、油雾、霉菌及灰尘等环境。

1.2.2 其他工作条件

(1) 自动化系统应能按规范要求的电源电压和频率偏离额定值的波动条件下正常工作。当电源的谐波成分不大于 5%时,自动化系统应能正常工作。

(2) 自动化系统应具有必要的电磁兼容性。

(3) 自动化系统的液压和气动设备,应能在动力源压力变化额定值的±20%时正常工作,在设计压力值的 1.5 倍时不损坏。

1.2.3 故障安全

(1) 控制系统、报警系统和安全系统应按故障安全原则设计。故障安全原则不仅应考虑与之有关的机械,而且应考虑整个装置,甚至船舶及人员的安全。

(2) 控制系统、报警系统和安全系统的设计,应能使运行过程中出现的一个故障不会导致其他故障的产生,并且其产生的危险性降到尽可能低的程度。

(3) 自动控制和遥控系统应确保持续、有效、可靠地运行。

1.2.4 独立性

(1) 控制系统、安全系统和报警系统或其他功能系统应设计相互独立,当其中的某一或多个系统发生故障时,应不影响其他系统的正常工作。

(2) 在任何情况下,a 类安全系统应独立于控制系统和报警系统,使之不受其他系统故障的影响,但 b、c 类安全系统不要求与其他的控制系统和报警系统完全独立。

(3) 机电设备不同单元的安全系统也应各自独立。当其中某一部分的安全系统发生故障时应不妨碍另一部分安全系统的正常工作。

1.2.5 检测和锁定

对控制系统、安全系统和报警系统的功能应能进行检查。如果控制设备、安全设备和报警设备的灵敏度和极限值等整定值可以调节,则调定的数值应易于检查、辨认并予以锁定。

1.2.6 供电

控制系统、安全系统和报警系统应由主配电板或应急配电板（若设有时）供电。当正常电源失电时，安全系统、报警系统以及正常电源失电时仍有必要供电的控制系统（例如电站的自动化系统），应能自动转接到独立的备用电源供电，并发出报警。如可采用蓄电池组作为备用电源，该蓄电池组的容量应至少能维持 15min 供电需要。

若上述系统可能因电源的中断而受到有害影响时，则应采用不中断的方式转换到备用电源。

1.3 控制系统

(1) 控制系统包括自动控制系统和遥控系统。

(2) 控制系统应具有良好的控制品质。控制系统以及被控制的机电设备，在其全部运行工况范围内应具有满意的特性，即应能稳定工作，不会使机电设备受到有害的机械负载和热负载，并具有必要的控制精度。

(3) 控制系统的设计，应能使控制系统中出现的故障对控制过程产生的危险性降到尽可能低的程度，并且不会使使用的自动和/或手动控制失效。

(4) 对于安全操纵船舶所必需的所有机电设备，当自动控制系统或遥控系统发生故障或失效（包括动力源中断）时，应能：

1) 发出报警信号。

2) 及时更换损坏的部件或投入备用设备以恢复正常的控制功能（若适用时）。

3) 转换到就地手动控制，转换控制时不应引起机电设备运行状态的严重变化。

(5) 除非操作上必须，主机、可调桨、锅炉和电站的控制系统应各自独立，每一独立推进装置应设有独立的控制系统。

(6) 如果有措施能保证各系统公用部分的设备能受到有效的监测，且在发生故障时能发出报警，可允许其局部公用。

(7) 如推进装置由驾驶室遥控，不论机器处所是否有人值班，自动控制系统应设计为：当推进装置因即将发生的或紧急的减速或停车而引发的临界报警能确保准确及时地提供给负责航行的值班驾驶员，以帮助其评估紧急情况下的航行条件。尤其是该自动控制系统在进行控制、监视、报告、报警以及采取减速或停车的安全措施的同时，还应能为负责航行值班的驾驶员提供实施手动的干预（如越控），但那些因手动干预而导致机器和/或推进设备短时间内完全失效（如超速）的情况除外。

2 柴油机冷却水温度自动控制系统

柴油机在运行中，气缸套和气缸盖必须采用淡水来冷却，冷却水的温度应保持在给定值附近。这对柴油机安全、可靠和经济地运行是十分重要的。气缸冷却水温度控制的方法是把冷却水分成两部分：一部分通过淡水冷却器，经海水冷却使水温降低；另一部分不通过淡水冷却器，直接与经过冷却的淡水相混合，然后进入柴油机气缸的冷却空间。若冷却水温度偏高，则需要减少不通过冷却器的旁通冷却水量，而增加通过冷却器的淡水流量。反之亦然，以此来控制柴油机缸冷却水的温度。

2.1 MR-II 型电动冷却水温度控制系统

电动冷却水温度控制系统有许多不同的类型，既有用单元组合式仪表组成的控制系统，也有用基地式仪表构成的系统。下面介绍用基地式仪表 MR-II 型温度指示调节器组成

的气缸冷却水温度控制系统。

2.1.1 系统的组成

图 7.3-1 为该系统的组成原理图。系统由 MR-II 型温度指示调节器 1、开关组 2、限位开关 3、过载保护继电器 4、三相交流伺服电动机 M、三通阀 5 和淡水冷却器 6 组成。其中限位开关，过载保护继电器和三相交流伺服电动机属于执行机构，装在冷却水进口管路的三通阀上。MR-II 型调节器是电动基地式仪表，它把测量、显示、调节各单元及相应的开关元件组装在一个控制箱内，并安装在机舱的集控室内。

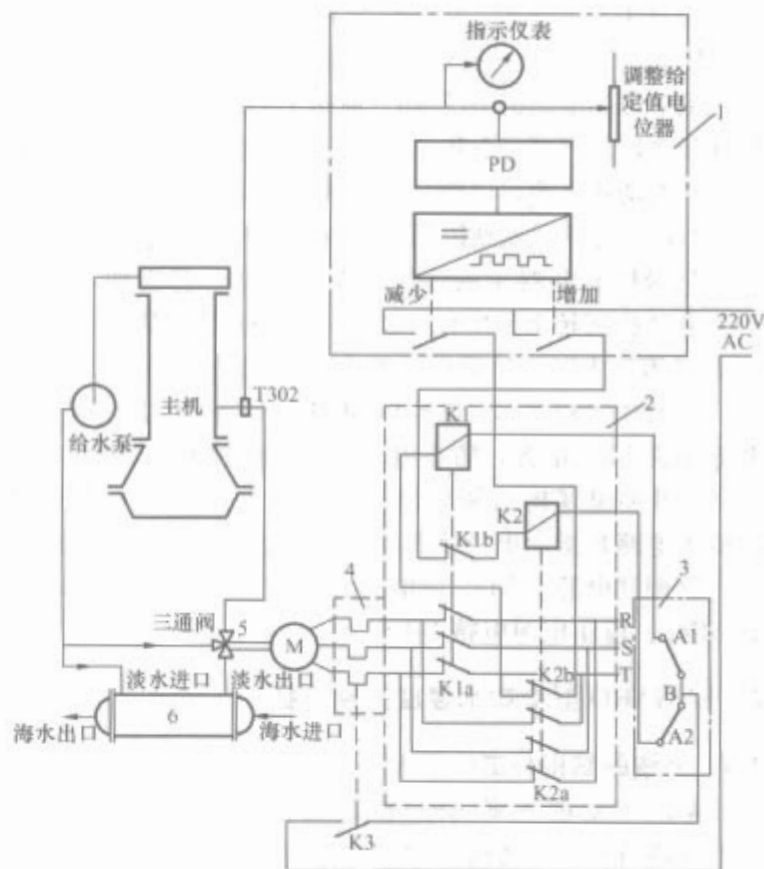


图 7.3-1 MR-II 型电动冷却水温度控制系统原理图

1—温度指示调节器；2—开关组；3—限位开关；4—过载保护继电器；5—三通阀；6—淡水冷却器

2.1.2 系统的工作原理

该系统所用的测温传感器是 T802 型热敏电阻，它被安装在冷却水进口管路中。T802 型热敏电阻具有负的温度系数，即温度升高其电阻值降低，两者成线性关系。在 MR-II 型温度指示调节器中，热敏电阻值的变化（即冷却水温度的变化）被按比例地转换为电压信号。这个测量信号一方面被送入指示电路进行显示；另一方面与由电位器调定的给定值进行比较得到一个偏差电压信号 e ，此偏差信号再经比例微分运算后输出一个控制信号送至脉冲宽度调制器。在脉冲宽度调制器中，将此连续变化的控制信号调制成脉冲信号。若测量温度高于给定值，脉冲宽度调制器输出的脉冲信号使“减少输出继电器”断续通电，接触器 K1 也断续通电，其触点 K1a 断续闭合，使三相交流伺服电动机 M 向正方向断续转动，再经减速装置带动两个互成 90° 的平板阀。这两个平板阀一个控制旁通水量，另一个控制淡水经过冷却器的水量。当电动机 M 断续正转时，旁通阀被关小，经冷却器的淡水阀被开大，使冷却水的温度逐渐下降，直至偏差 e 为零。如果测量温度低于给定值，则脉冲宽度调制器输出的脉冲信号使“增加输出继电器”断续通电，接触器 K2 断续通电，其触点 K2a 断续闭合，电动机 M 断续地反转，旁通阀开大，经冷却器的淡水阀关小，使冷却水的温度逐渐升高，直到 e 为零。而当测量温度等于给定值时，偏差信号 e

等于零,脉冲宽度调制器没有脉冲信号输出,“减少输出继电器”和“增加输出继电器”均断电,K1a和K2a均断开,电动机M停转,三通阀开度保持不变,这样,冷却水的温度也就不变而维持在给定值上。图中触点K1b和K2b起连锁作用,目的是使K1和K2不能同时通电动作。

在MR-II型温度调节器中实现了PD运算和P型脉冲宽度调制,它与积分执行器(伺服电动机)串接在一起,可实现准连续调节规律。因此,在理论上,该系统对于阶跃输入信号,是一个无差系统。

限位开关3的作用,在接触器K1和K2的电路中都串联了一个限位开关。在一般情况下,限位开关合于A1和A2。电路连通。但当电动机M带动三通阀中的两个平板阀转到接近极端位置时,开关A1和A2断开,使接触器K1或K2断电,切断电动机电源,以防止平板阀卡紧在极端位置,使电动机回行时动作不灵敏或因电动机负载过大而引起过热。

过载保护继电器4的作用:在运行中,若出现某些故障,如电动机回转部分卡住,绕线绝缘降低等原因使电动机M工作电流过大时,过载保护继电器就会动作,使触点K3断开,从而使接触器K1和K2均断电,K1a和K2a均断开,切断电动机M的电源,防止电动机因电流过大而烧毁。

MR-II型温度指示调节器的电路,主要由六个部分组成:输入电路和指示电路MRB、比例微分运算电路MRV、脉冲宽度调制电路MRD、继电器和开关装置MRK、主电源电路MRP、稳压电源电路MRS。

2.2 ENGARD型冷却水温度控制系统

2.2.1 系统的结构与工作原理

该系统主要由ENGARD控制器、中央冷却器、海水泵、温度调节阀(三通阀)、温度传感器、电动机等组成。

ENGARD型控制系统用单片机作为控制核心部件,与常规仪表控制的系统比较,具有控制功能强、可靠性好、使用灵活方便等优点。该系统还应用了海水流量来进行冷却控制,以达到节能的目的。系统的工作原理如图7.3-2所示。

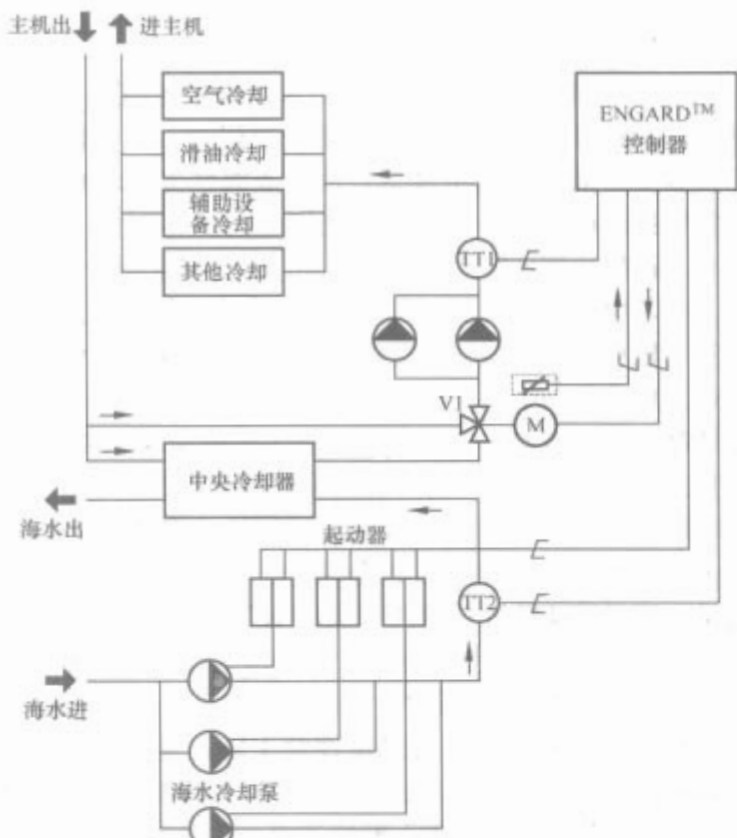


图 7.3-2 系统工作原理图
TT1—淡水温度传感器; TT2—海水温度传感器;
V1—温度调节阀

ENGARD型控制系统有3个海水泵,通过对这三个海水泵的控制,可得到4种海水流量。在某一确定的海水流量下,冷却水温度由温度调节阀(三通阀)控制。主机出口的高温淡水分为二路,一路进入中央冷却器冷却后到达温度调节阀,另一路经旁通管路直接进入温度调节阀,二路混合后温度便降低了,然后经淡水泵再去对主机进行冷却。显然,改变旁通阀的开度便能控制主机进口的淡水温度,旁通阀开大,进口水温高,旁通阀关小,则进口水温低。淡水温度传感器TT1将淡水温度的变化传送到ENGARD控制器,与控制器中的温度设定值进行比较,再通过比例积分(PI)作用,控制电动机转动,改变旁通阀的开度,以使主机进口的淡水温度维持在给定值上。

该系统还能使海水以最佳的流量进入中央冷却器,这样既能实现冷却水温度控制,又不会泵入过多的海水,以达到节能的效果。最佳海水流量控制和冷却水温度控制均由ENGARD控制器实现。最佳的海水流量不仅取决于热负载还与海水温度及冷却器中的污垢程度有关。系统逐步的在4种海水流量中选择一个最佳的流量,然后在此流量中按比例积分控制规律来调节冷却水的温度,使它维持在给定值上。

2.2.2 ENGARD型控制器

(1) 控制器的组成。ENGARD型控制器是AIFA LA-VAI公司的产品,控制器的核心部件是一个8位的单片机,带有PROM、EEPROM和RAM等存储器。控制器具有比例积分温度控制功能,还可与外部计算机进行通信。

控制器具有自动和手动功能,海水泵和调节阀均可设置为手动控制,当海水泵设为手动控制时,调节阀仍然为自动控制;反之亦然。

控制器还具有报警功能,当海水泵及温度控制回路发生故障时,它能发出报警信号。

(2) 调节阀的控制和显示。由淡水和海水温度传感器(TT1和TT2)将温度的变化传送到ENGARD型控制器。安装在调节阀上的电位器将旁通阀的位置反馈到控制器。当淡水温度偏离给定值时,控制器就输出控制信号去改变旁通阀的开度,使淡水温度回到给定值。

控制器的显示板上会显示出冷却水的温度和旁通阀的开度。若需要,还可显示海水温度。

(3) 最佳海水流量控制。单片机将调节阀位置的反馈信号与对应的切换设定数值比较,当位置反馈信号达到设定值时,海水泵开始切换,改变海水流量。

海水泵的切换参数也可设置为温度参数,即当淡水温度传感器(TT1)的数值达到对应的切换参数值时,海水泵开始切换。

(4) 控制器的输入和输出信号。控制器的输入信号来自辅助监视装置和温度传感器,以符号I表示。控制器输出开/关和增加/减少信号到辅助设备,以符号U表示。输入和输出如图7.3-3所示。

(5) 温度调节。

1) 冷却水温度控制。控制原理如图7.3-4所示。控制器接收到来自温度传感器TT1的信号,将此信号与温度给定值进行比较,假设温度超过给定值,则控制器输出控制信号去关小旁通阀,使温度降低,直至回到给定值。当温度超过上限或低于下限,控制器立即发出报警信号。

2) 海水泵的控制。当温度调节阀的位置到达海水泵的切换值时,表示当前的海水流量不是太大就是太小了,控制器随即输出一个起动信号去起动一个较大的或较小的海水泵(指泵容量的大小),从而改变海水流量。当泵起动后,应输出一个反

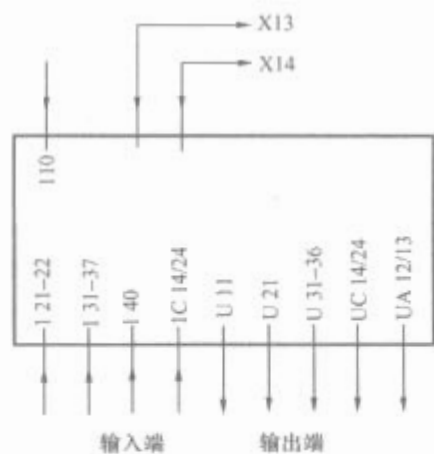


图 7.3-3 输入和输出功能

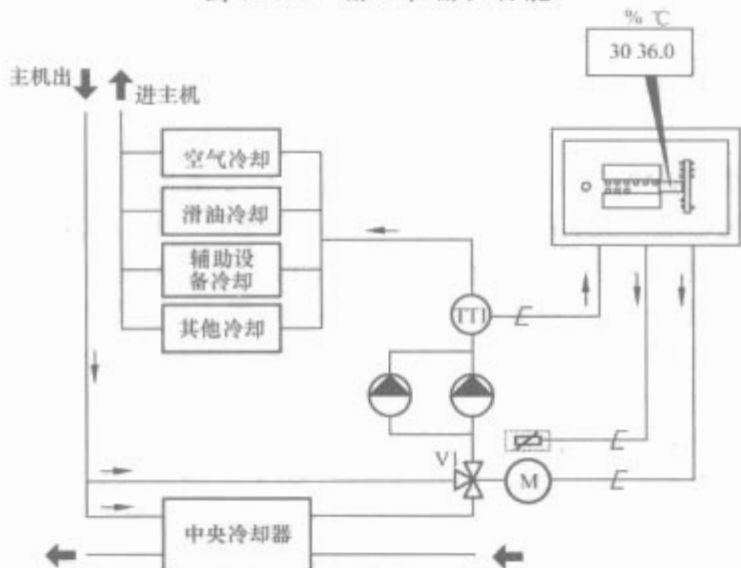


图 7.3-4 冷却水温度控制原理

馈信号到控制器，以确认泵的起动。如果控制器没有接收到确认信号，便会发出报警信号。控制原理如图 7.3-5 所示。

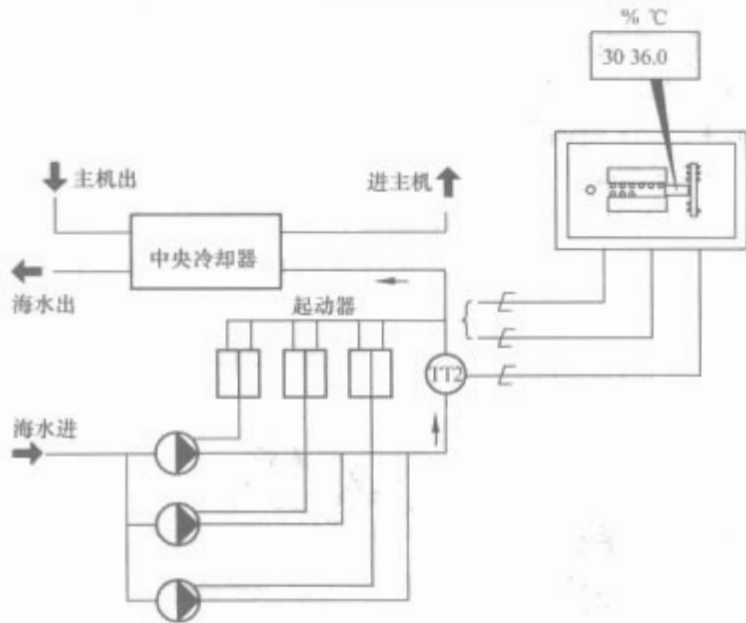


图 7.3-5 海水泵的控制原理

2.2.3 海水泵

2.2.3.1 泵的组合

海水回路包含有 3 个相同的海水泵，每个泵都带有一个双速电动机，电动机的转速不同，则泵的流量就不同。泵的组合及流量可用图 7.3-6 和表 7.3-3 来说明。

表 7.3-3 泵 的 组 合

海水泵装置		容 量
流 量	泵的组合	
1	A+B 或 A+D 或 B+D	100%
2	A 或 B 或 D	75%~85%
3	C 或 E	40%~60%

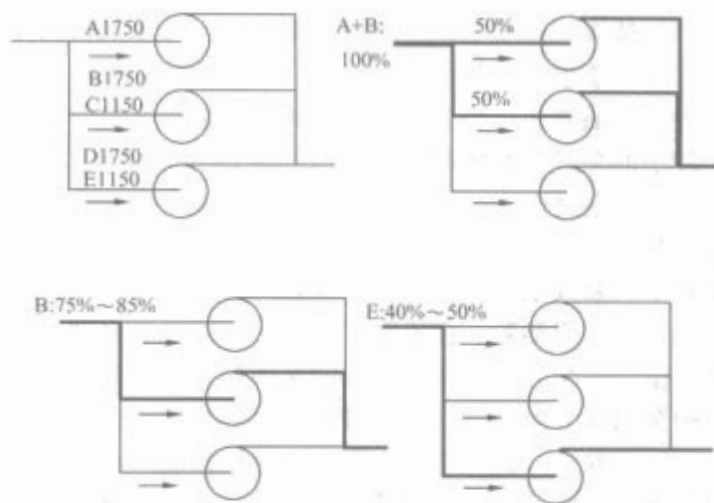


图 7.3-6 泵的组合

图 7.3-6 中，三个相同的泵工作时，其中两个泵带有双速电动机，每当两个泵均以高速并联运行时，便得到 100% 的额定容量。第 4 种流量可通过泵的组合 A+C 或 A+E 或 B+E 或 C+D 得到。流量 1 消耗功率为 50kW，流量 2 消耗功率为 22kW，而流量 3 仅为 4kW。ENGARD 控制器能实现不同的泵的组合来得到 4 种海水流量，并在温度控制时，得到最佳的海水流量。

2.2.3.2 泵的起动

在图 7.3-7 中，假设起动 2 号电动机，控制器输出 U32 到电动机起动器的继电器进行起动，同时在规定的时间内控制器应收到 I32 确认该泵已起动，否则将会报警。

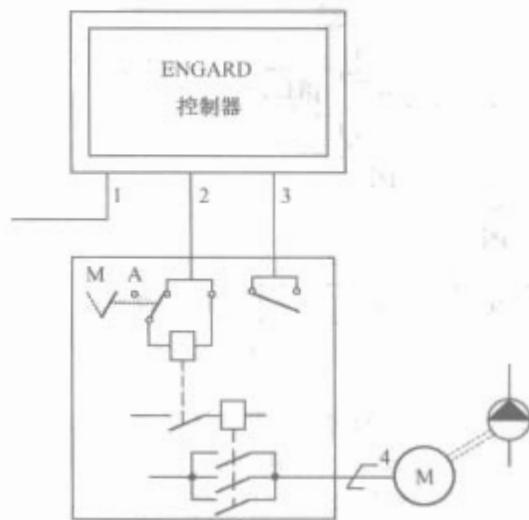


图 7.3-7 泵的起动

1—电源；2—起动信号；3—确认信号；4—电动机电源

泵在自动操作模式时，当泵起动时，控制器会选择一个运行泵，如果没有泵运行，控制器便起动最大的泵组合。

2.2.3.3 泵切换的准则

海水泵的切换有两种准则，按冷却水温度切换和按温度调节阀的位置切换。这两种准则也可以组合，例如最大的泵由温度控制，而较小的泵由阀位控制。

(1) 按调节阀的位置向大切换。热负载增加时，海水泵将会向大的泵切换，以大的海水流量加快冷却。当热负载增加时，需要较多的水到中央冷却器，因此旁通阀将关小，当阀位达到设定的切换值时，泵开始切换，一个较大的泵或者泵的组合开始起动，而原运行泵 5s 后停止工作。

(2) 按温度向大切换。此时旁通阀全关，所有的淡水均进入中央冷却器，故当热负载增加时，冷却水温度也增加。控制器将来自温度传感器（TT1）的信号与设定的切换参数比较，当温度信号达到切换值时，海水泵将向大的泵（容量）切换。

(3) 按阀位向小切换。热负载减小时,海水泵将向小切换,以节约能量。当热负载减小时,旁通阀将开大,使较多的水进入旁通管路,当旁通阀阀位到达切换设定值时,其下一个较小的泵或泵组将起动,原运行泵 5s 后停止工作。

(4) 按温度向小切换。此时旁通阀全关,当热负载减小时,冷却水温度就会下降。当温度下降到切换设定值时,下一个较小的泵或泵组将起动,而原运行泵 5s 后停止工作。

(5) 自适应参数。在通常工作中,单片机能自动调整切换设定值,一是为了避免在相同的泵中切换;二是更容易向较小的泵切换。由于有自适应参数,泵的切换将会在切换设定值到达前发生。这种切换完全由单片机控制,在稳定的工作中可靠地切换。当切换到某一流量时,不再切换,冷水却温度在此流量内回到给定值上,该流量就是最佳海水流量。

3 燃油黏度自动控制系统

3.1 VAF 型燃油黏度控制系统

3.1.1 系统的组成及工作原理

VAF 型燃油黏度控制系统组成原理图如图 7.3-8 所示。它主要由测粘计 1、差压变送器 4、调节器 3、气动调节阀 8、加热器 7 等组成。

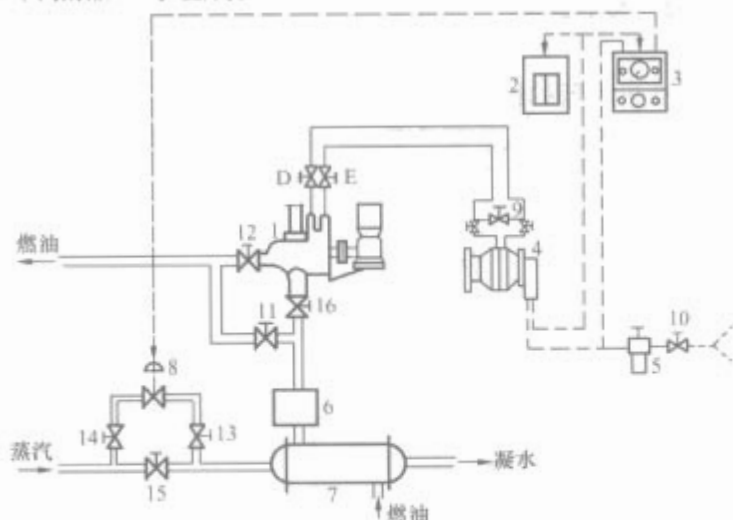


图 7.3-8 VAF 型燃油黏度自动控制系统

1—测粘计; 2—记录仪; 3—调节器; 4—差压变送器; 5—过滤减压阀; 6—燃油细滤器; 7—燃油加热器; 8—气动调节阀; 9—平衡阀; 10~16—截止阀

控制系统的工作原理是: 当系统受到扰动时, 例如主机负载突然变化, 燃油黏度就会偏离给定值, 通过测粘计检测燃油加热器出口的燃油黏度, 并转换为压差信号作为黏度的测量信号送到差压变送器, 差压变送器把该压差信号成比例地转换为 0.02~0.1MPa 的气压信号送至记录仪和调节器。调节器将变送器送来的测量值与给定值相比较得到偏差值, 然后根据偏差信号的大小和方向, 按比例积分调节规律输出一个控制信号, 去改变气动调节阀的开度, 调节进入加热器的蒸汽流量, 使燃油黏度重新恢复到给定值。

3.1.2 测粘计

测粘计是燃油黏度控制系统的测量单元, 它把黏度的变化转换为压差信号。它的结构原理如图 7.3-9 所示。

测粘计被安装在加热器和高压喷油泵之间的管路上, 主要由壳体外的齿轮泵以及黏度检测毛细管, 隔离套管等组成, 其中齿轮泵是由设于外侧的驱动电动机经减速装置来驱动的, 它以 100r/min 的恒定转速旋转。由图可知, 燃油从加热器引入测粘计以后, 大部分是经过测粘计发送到高压油泵中去, 其中, 一部分被齿轮泵采集到隔离套管内, 从而使

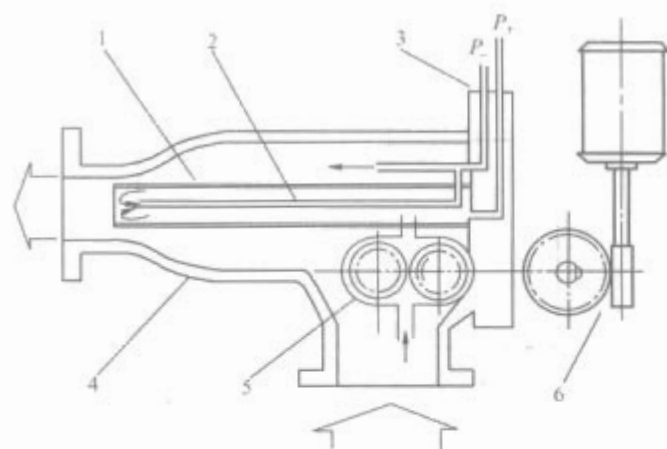


图 7.3-9 测粘计结构原理图

1—隔离套管; 2—黏度检测毛细管; 3—高、低压信号输出端; 4—测粘计外壳; 5—齿轮油泵; 6—驱动电动机及减速装置

隔离套管内的燃油有一个稳定的高压 p_+ 。在隔离套管内的高压燃油将从左到右, 通过一个细长毛细管。因为该毛细管内径很小 (内径为 2mm, 长为 200mm), 而且齿轮泵恒定的排量也较小, 所以流过毛细管的油流量很小而且是恒定的, 这样即便燃油以层流的方式通过毛细管。由于燃油的黏度不同, 所以通过毛细管的能力也不相同, 其输出端的压强将随着黏度的增高而降低, 该输出端的压强为低压信号 p_- , 而毛细管两端的压差 $\Delta p = p_+ - p_-$ 。因为毛细管内的流动是层流, 所以毛细管两端的压差 Δp 就与燃油黏度成正比关系, 图 7.3-9 中高、低压信号输出端 3 的压力差信号就反映了燃油黏度的实际值。

3.1.3 Barton273A 型差压变送器

差压变送器是燃油黏度控制系统中的变送单元。它把表示燃油黏度的压差信号成比例地转换为 0.02~0.1MPa 的气压信号, 分别送到调节器和黏度记录仪。差压变送器由测量和变送两部分组成。

3.1.4 VAF 型调节器

VAF 型调节器是按位移平衡原理工作的, 能实现比例积分调节规律。它由检测、给定、比较、放大、反馈、显示以及“手动—自动”切换等环节组成。其结构示意图如图 7.3-10 所示。

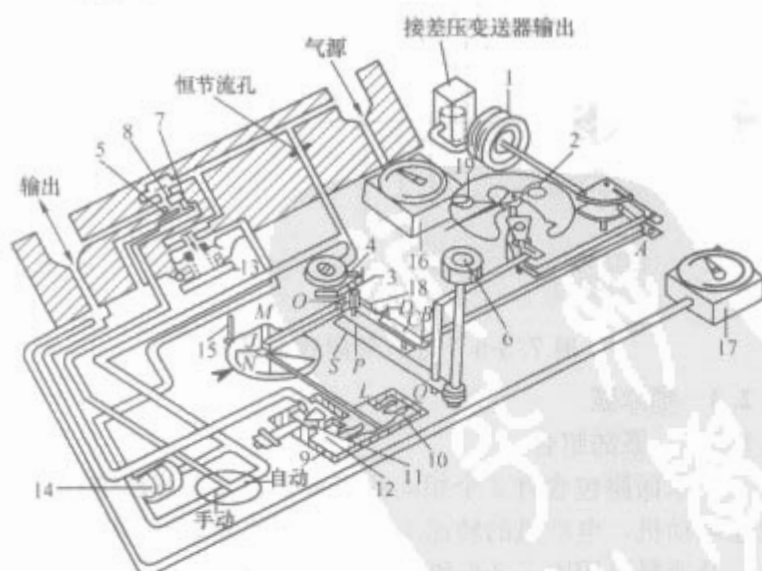


图 7.3-10 VAF 调节器的结构示意图

1—波纹管; 2—黏度测量值指针 (黑色); 3—挡板; 4—喷嘴; 5—气动放大器; 6—调节给定值指针旋扭; 7—膜片; 8—放大器阀心; 9—积分组件; 10—积分波纹管; 11—积分阀; 12—积分室; 13—调节阀旋扭; 14—压力指示器; 15—比例带调节旋扭; 16—气源压力表; 17—输出压力表; 18—弹簧杆件; 19—黏度给定值指针 (红色)

3.1.4.1 工作原理

当控制系统处于平衡状态时,燃油黏度的测量值等于给定值,调节器上的测量指针(黑色)与给定值指针(红色)相重合。

当系统受到扰动时,测量值偏离给定值而产生偏差。如果燃油黏度增加,则测量值大于给定值,由差压变送器来的气压信号增大,使测量波纹管/伸长,通过连杆使扇形抢绕固定轴逆时针转动一个角度。这时黑色测量指针向指示黏度增加的方向转动,同时连杆 AB 上移,使杠杆 BD 以 C 为支点逆时针偏转, D 点下移,通过弹簧 18 的挠性连接使 P 轴顺时针偏转。装在 P 轴上的挡板 3 离开喷嘴 4,喷嘴背压降低。背压经“手动—自动”转换阀作用在功率放大器 5 的膜片 7 下面,使膜片 7 连同排气阀座一起下移,开大排气阀,调节器输出压力下降(调节器是反作用式的)。这个降低的气压信号送到气关式蒸汽调节阀,开大阀门,增加进入加热器的蒸汽量,使燃油黏度下降。调节器的比例积分作用是通过反馈环节实现的,调节器的输出有一路进入反馈波纹管 10,而另一路要经过积分阀 11 才能进入积分气室 12。在调节器输出气压下降的瞬间,波纹管内的压力瞬间降低,由于积分阀的节流作用,此时积分气室内的压力暂时不变,因此反馈波纹管在内外压力差的作用下被压缩,于是使推动反馈杆 LN 左移。比例带调节盘的拨动杆 MN,反馈杆 LN 和反馈弹簧片 JO 的端点铰接在一起。铰接点的运动轨迹是以 M 点为圆心,以 MN 为半径的圆弧。当反馈杆 LN 左移时,铰接点会沿圆弧下移,反馈弹簧片 JO 下移,使杆 OC 以 P 为轴逆时针偏转, C 点上移,因这时 B 点已不动,故 C 点上移时, BD 杆以 B 为支点顺时针转动, D 点上移,通过弹簧挠性连接使 P 轴逆时针偏转,挡板靠近喷嘴,这便是负反馈作用。当输入信号使挡板离开喷嘴的位移与反馈作用使挡板靠近喷嘴的位移相平衡时,喷嘴挡板之间的开度暂时稳定下来,这时挡板开度比原来的开度稍大一些,故输出气压也比原来下降一些。显然,偏差值越大则挡板开度的变化也越大,输出气压的变化就越大。以上便是调节器的比例调节规律,是由负反馈作用实现的。随着时间的逐渐增加,积分气室内的空气逐渐经过积分阀向输出管路放气,积分气室内的气压就逐渐下降。于是,反馈波纹管内的压差就逐渐减小,使 LN 杆逐渐右移,反馈弹簧片 JO 逐渐上移,结果使挡板又逐渐离开喷嘴,调节器的输出气压随时间又逐渐下降,这是个附加的正反馈作用。这个附加的正反馈作用实现了积分调节规律,用以消除系统的静态偏差。直至燃油黏度的测量值回到给定值,偏差为零,喷嘴挡板的开度就固定在新的值上,整个控制系统处于新的平衡状态,测量指针又与给定指针重合。

反之,当燃油黏度减小时,差压变送器的输出气压就减小,调节器的输出就按 PI 规律上升,蒸汽调节阀就关小,使燃油黏度升高,直到黏度重新上升到给定值时,控制系统就再次稳定。

3.1.4.2 比例带和积分时间的调整

比例带的调整是通过改变负反馈的强度来实现的。改变比例带调整盘上 M 点的位置就可以改变负反馈的强度。比例带调整盘如图 7.3-11 所示,转动比例带旋钮,将比例带盘和 M 点一起转动。若逆时针转动 M 点,则在反馈杆 LN 位移相同的情况下,反馈簧片 JO 上下移动的距离大,负反馈强,比例作用弱,比例带大,例如 M 点在水平位置时,其比例带最大。反之,顺时针转动 M 点,则负反馈弱,比例作用强,比例带就小,例如 M 点在上面垂直位置时,其比例带最小。比例带的大小在比例带调整盘上有刻度标记。

积分时间的调整是通过改变积分阀的开度来实现的,开

大积分阀,积分时间短,积分作用强。反之,关小积分阀,积分时间长,积分作用弱。积分阀旋钮上也标有积分时间的刻度。

3.1.4.3 给定值的调整

改变给定值是通过转动给定值调整旋钮 6 来实现的(见图 7.3-11)。顺时针转动旋钮,经齿轮传动使杆 QS 绕 S 点逆时针转动一个角度。它一方面使指示盘上的给定值指针向指示黏度增加的方向转动,另一方面,由于 JO 杆不动, P 点上移, C 点上移, BD 杆绕 B 点顺时针转动,通过弹簧 18 使 P 轴逆时针转动,挡板靠近喷嘴,这与给定值不变而黏度降低的效果是一样的。经调节器的 PI 调节作用,使燃油黏度逐渐增加并稳定在新的给定值上。所以,顺时针转动给定值调整旋钮可以增大给定值,逆时针转动旋钮可减小给定值,其动作过程与上述相反。

3.1.4.4 正、反作用切换

上述介绍的调节器是采用反作用式的工作方式,即燃油黏度增大,调节器输出减小,或燃油黏度减小,调节器输出增大。反作用式调节器必须与气关式调节阀配套使用,保证燃油黏度控制系统是一个负反馈控制系统,否则,成为正反馈系统,燃油黏度不能自动调节在给定值上。采用气关式调节阀的好处是,一旦气源中断,蒸汽调节阀会全开,保证黏度不会升高。但如果采用气开式调节阀,那么调节器就必须改正作用式,即燃油黏度增大时,调节器输出增大,使蒸汽调节阀开大。将调节器从反作用式切换成正作用式,只需把喷嘴顺时针转动 90° ,使它对准下面的挡板 b。同时,顺时针转动 M 点,使它从左上角转到右上角(见图 7.3-11)。这样,调节器就成为正作用式了。

3.1.4.5 “手动—自动”切换

调节器上装有“手动—自动”切换开关。自动控制时,切换开关放在“自动”位置,这时,手操调压阀输出信号被切除,喷嘴背压经“手动—自动”转换阀的自动管路送到放大器 5。手动控制时,可把“手动—自动”切换开关转到“手动”位置,这时喷嘴背压信号被切除,手操调压阀 13 输出的气压信号经“手动—自动”转换阀的手动管路送到放大器 5,改变手操调压阀的输出就可以改变调节器的输出。但在切换到手动控制方式之前,应把手操调压阀的输出气压调到等于喷嘴的背压(这可以从压力指示器 14 上看出),然后再把转换开关从“自动”切换到“手动”,以实现无扰动切换。

3.1.5 蒸汽调节阀

VAF 型黏度控制系统所用的调节阀可以是气动薄膜式调节阀也可以是活塞式调节阀。下面介绍带有阀门定位器的活塞式调节阀,它的结构原理如图 7.3-12 所示,它由定位器、活塞执行机构和调节阀三个部分组成。

气源压力是 $0.4 \sim 0.6 \text{ MPa}$, 分别送到定位器的 D 和 G 空间,由减压阀 15 减压到 0.14 MPa 的气压送入活塞下部空间 H。调压阀在没有输入信号的情况下,活塞下部空间的 0.14 MPa 气压能保证克服阀杆、气缸壁等处的摩擦和活塞的重量等,使阀心 17 处于全开状态。

阀门定位器是一个比例环节,能保证活塞 16 的位置与输入信号成比例关系。调节器的输出信号作为阀门定位器的输入信号进入 A 室,并作用在膜片 1 上。若燃油黏度降低,

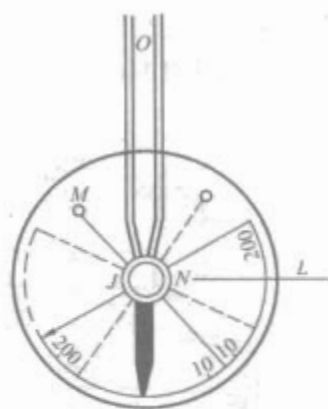


图 7.3-11 比例带调整盘示意图

调节器输出气压信号增大, 阀扼 2 右移, 导向阀 8 与导向喷嘴 9 之间的开度减小, D 室压力升高。使膜片 10 连同放气

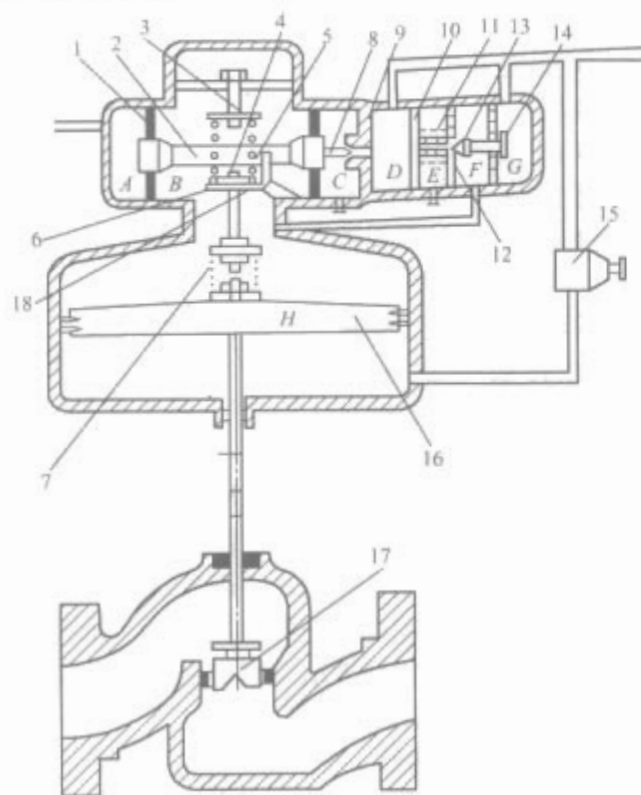


图 7.3-12 带有阀门定位器的活塞式调节阀结构原理图

- 1—膜片; 2—阀扼; 3—调整螺钉; 4—调零螺钉;
5—轭销; 6—折角曲柄; 7—反馈弹簧; 8—导向阀;
9—导向喷嘴; 10—膜片; 11—弹簧; 12—放气阀座;
13—放气阀; 14—进气阀; 15—调压阀; 16—活塞;
17—阀心; 18—支点

阀座 12 一起右移, 关闭放气阀 13, 开大进气阀 14。于是 F 室压力升高, 即活塞上部空间 B 室压力升高, 推动活塞 16 下移, 关小调节阀, 减小进入加热器的蒸汽量。

随着活塞的下移, 通过反馈弹簧 7 拉动折角曲柄 6 绕支点 18 逆时针转动, 通过轭销 5 给阀扼一个向左的作用力来抵消控制信号对阀扼向右的作用力, 这是负反馈作用。当两个作用力相等时, 调节阀处于新的平衡状态。这时, 通过阀心的蒸汽量正好满足负载要求, 使燃油黏度保持在给定值上。如果阀杆与填料之间, 活塞与气缸壁之间摩擦力太大或有卡牢等现象, 由于阀门定位器的输出能使活塞上下空间具有很大的压差, 强制活塞移动。只要活塞移动, 反馈环节就起作用, 这样就能实现活塞和阀心的准确定位, 这就是阀门定位器的作用。

3.2 NAKAKITA 型燃油黏度控制系统

3.2.1 系统的组成及功能

NAKAKITA 型燃油黏度控制系统是在类似于 VAF 型黏度控制系统的基础上, 增加了温度程序控制装置和“柴油—重油”自动转换装置。核控制系统的组成原理图如图 7.3-13 所示。

黏度定值控制部分主要由测粘计 24、差压变送器 20、黏度调节器 9 和蒸汽调节阀 6 等成, 这一部分的工作过程和 VAF 型控制系统相同。温度程序控制部分主要由温度变送器 25、温度程序调节器 8 和蒸汽调节阀 6 等组成。“温度—黏度”控制选择阀 7 的作用: 当油温低于上限值时 (例如 130℃, 可调整), 它选择温度调节器的输出去控制蒸汽调节阀, 对燃油温度进行程序控制; 在油温达到上限值时, 它选择黏度调节器的输出去控制蒸汽调节阀, 对燃油黏度进行定值控制。

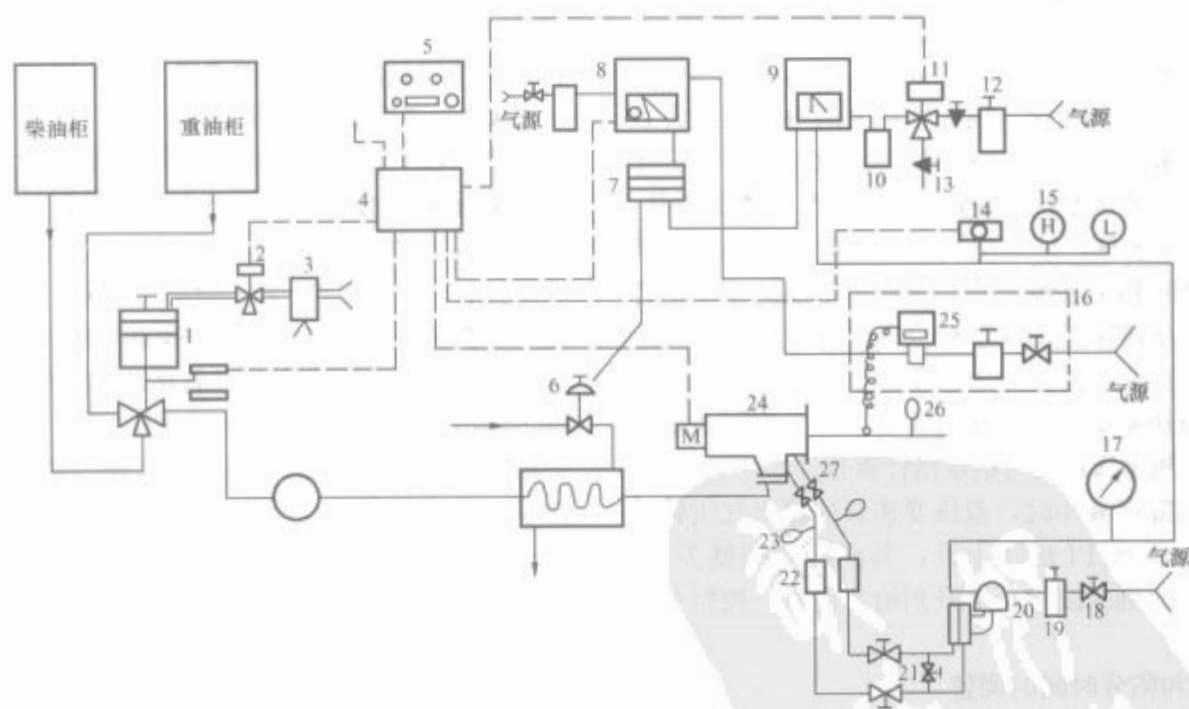


图 7.3-13 NAKAKITA 型燃油黏度控制系统组成原理图

- 1—三通活塞阀; 2—三通电磁阀; 3—空气过滤器; 4—继电器箱; 5—选择器; 6—蒸汽调节阀;
7—控制选择阀; 8—温度程序调节器; 9—黏度调节器; 10—气容; 11—三通电磁阀; 12—过滤减压阀;
13—针阀; 14—黏度记录仪; 15—压力开关; 16—调整板; 17—黏度指示仪; 18—截止阀;
19—过滤减压阀; 20—差压变送器; 21—截止阀和平衡阀; 22—油分离器; 23—阻尼元件; 24—测粘计;
25—温度变送器; 26—阻尼元件; 27—截止阀

该系统的主要功能是: 当燃油温度在下限和上限之间变化时, 黏度控制不起作用, 蒸汽调节阀受温度程序调节器的控制; 当燃油温度达到上限值时, 系统能自动切除温度程序

控制而转换为黏度定值控制, 蒸汽调节阀受黏度调节器控制。“柴油—重油”自动转换也是以油温为条件的, 在燃油系统投入工作之前, 若油温较低并处于下限值 (如 20℃,

可调),虽然已把“柴油—重油”转换开关切换到重油位置,但燃油系统仍用柴油工作。燃油在温度程序调节器的控制下,温度慢慢升高,当油温达到中间温度值(如 70°C ,可调)时,控制电路亦通过三通电磁阀2和三通活塞阀1使燃油系统由用柴油换为用重油工作。由于此时油温低于上限值(130°C ,可调),对重油的加热仍受温度程序调节器的控制,直到油温上升到上限值时才能对重油转为黏度定值控制。

该控制系统增加了温度程序控制,这就避免了在油温较低的情况下,采用黏度控制会使油温升高过快的现象,从而可改善喷油设备的工作条件。“柴油—重油”自动转换可使在油温较低的情况下,燃油系统使用柴油工作,这既能保证良好的雾化质量,又能用柴油冲洗用过重油的管路,保证控制系统和喷油设备工作的可靠性。

测粘计与 VAF 型系统的测粘计相同,差压变送器采用双杠杆差压变送器,黏度调节器采用 NAKAKITA 型 PID 调节器。下着重介绍温度程序调节器,“温度—黏度”控制选择阀,三通电磁阀和三通活塞阀的结构和工作原理,以及整个控制电路的工作过程。

3.2.2 温度程序调节器

温度程序调节器的结构和工作原理与 NAKAKITA 型黏度调节器完全相同。只是多了一套温度程序设定装置,以及调节器是采用正作用式的。该调节器用于燃油黏度自动控制系统中,它是按照位移平衡原理工作的,能实现 PID 控制作用。

当燃油黏度的测量值与给定值相等时,调节器处于平衡状态,黑色测量指针与红色给定指针重合。这时,喷嘴与挡板之间的开度不变化,调节器的输出为某一稳定的值。比例波纹管、积分波纹管、微分气室及积分气室的压力都相等,并等于调节器的输出压力。

当系统受到扰动时,燃油黏度的测量值就会离开给定值而出现偏差,假设黏度减小,小于给定值,则差压变送器将输出一个与黏度成比例的减小了的气压信号,经控制板进入弹簧管。弹簧管因压力减小而收缩,使测量连杆带动 HED 杆和 HEM 杆以 E 为轴顺时针转动。它一方面使黑色测量指针绕 Q' 轴向指示黏度减小的方向转动。另一方面 D 点左移使 AC 杆绕 C 轴顺时针转动,BO' 杆左移,OO' 杆以 O 为支点逆时针转动,使挡板靠近喷嘴,喷嘴背压升高,经功率放大器放大后使调节器的输出压力升高(这是反作用式调节器)。这个升高的输出压力信号,一方面去气关式蒸汽调节阀,关小调节阀使燃油黏度增加;另一方面经反馈环节,实现 PID 控制作用。调节器的反馈环节是由比例波纹管、微分气室、微分阀、积分气室、积分阀和积分波纹管等组成。调节器输出的气压信号首先进入微分波纹管,由于波纹管内压力大于微分气室的压力,微分波纹管伸长,挤压微分气室。使微分气室和比例波纹管内压力瞬间增大,这时比例杆以传动杆 B 点为支点略有上移,使挡板略微离开喷嘴,这一负反馈作用很弱,所以调节器的输出压力便大大升高,这就是调节器的比例微分输出。随着时间的增加,调节器的输出气压信号不断经微分阀向微分气室和比例波纹管充气,使比例波纹管内压力不断增大,负反馈作用不断加强,挡板又逐渐离开喷嘴,调节器的输出压力不断下降,这就是微分输出的消失过程。当测量信号使挡板靠近喷嘴的位移量与负反馈信号使挡板离开喷嘴的位移量相平衡时,微分作用便消失在比例输出上。积分作用是通过正反馈实现的,调节器输出的气压信号经微分阀向微分气室充气的同时,经积分阀向积

分气室充气,使积分波纹管内压力不断增大,挡板又逐渐靠近喷嘴,调节器输出压力又逐渐增大,这一附加的正反馈作用是用来消除静态偏差的,当燃油黏度的测量值与给定值相等时,调节器又重新处于平衡状态,喷嘴与挡板之间的开度不再变化,调节器的输出压力稳定在某一数值上,测量指针与给定指针又相重合。如果燃油黏度大于给定值,调节器的动作方向与上述相反。

该调节器上有三个调整盘,分别用来调整比例带,积分时间和微分时间。改变微分阀的开度可调整微分时间,开度小,微分时间长,微分作用强。改变积分阀开度可调整积分时间,开度大、积分时间短,积分作用强。比例带调整盘是个偏心机构,转动比例带盘可平行地改变喷嘴相对挡板的位置。这样,挡板转动相同的角度,挡板与喷嘴之间的开度变化量不同,比例带也就不同。

给定值的设置是通过转动给定值调整旋钮来实现的。若需增大给定值,可顺时针转动给定值旋钮,这时红色给定指针逆时针转动,黏度的指示值增大。另一方面使 QS 杆绕 Q 轴逆时针转动,RC 杆左移。因为此时黏度的测量值暂时未变,A 和 D 点不动,所以使传动杆 BO' 左移,挡板靠近喷嘴,调节器输出压力增大,这与黏度降低并小于给定值的效果是一样的。于是蒸汽调节阀关小,使测量指针逐渐向给定指针靠近,经调节器的 PID 作用,最终测量指针又与给定指针重合。

图 7.3-14 是温度程序设定装置原理图,它是在给定指针上加装一个驱动杆。小齿轮带动扇形齿轮时,驱动杆与给定指针一起转动。驱动杆上装有上、下限开关,两个开关的开闭状态由开关杆控制。当驱动杆转动时,开关杆沿着控制板移动,驱动杆上还装有中间温度限位开关,它的开闭状态由可调凸轮控制。改变可调凸轮的位置可调整中间温度值,当中间温度值确定后(如 70°C),可调凸轮的位置固定不变。带动扇形齿轮的小齿轮可以手操给定值旋钮使其转动,也可以由同步电动机 SM1 和 SM2 经减速装置来驱动。按下给定值旋钮,离合器脱开,转动给定值旋钮可手动设定温度给定值。拉出给定值旋钮,离合器合上,电动机 SM1 和 SM2 的转动通过差动减速齿轮装置和离合器使小齿轮转动,带动扇形齿轮,即带动驱动杆和温度给定指针转动。

温度程序调节器的工作过程。在控制系统没有投入工作时,燃油温度低于下限值(调整控制板上的下限温度设定器位置可调整温度下限值),开关杆与下限温度设定器相碰,下限开关闭合,上限开关断开,中间温度限位开关触头没有被可调凸轮压下。在控制系统投入工作时,先把“柴油—重油”转换开关转换到“重油”位置,合上电源开关,同步电动机转动,并经过差动减速齿轮装置和小齿轮带动驱动杆和给定指针以设定的速度向增大温度给定值的方向转动,经调节器的 PID 控制作用,燃油温度的测量值将以相同的速度跟踪给定值上升。温度给定值上升的速度可以通过转动“温度上升—下限速度”设定开关进行调整。设定开关有五挡,即 0、1、2、3、5,分别控制电动机 SM1 和 SM2 的转动方向,两个电动机都经差动减速装置带动小齿轮转动,但它们的减速比不同,SM2 的减速比小于 SM1。这样,两个电动机的转动方向不同,温度给定值的变化速度不同。以增大温度给定值为例,“温度上升—下降速度”设定开关在不同挡上,电动机 SM1 和 SM2 的转动方向及相应的温度给定值的上升速度($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)见表 7.3-4。

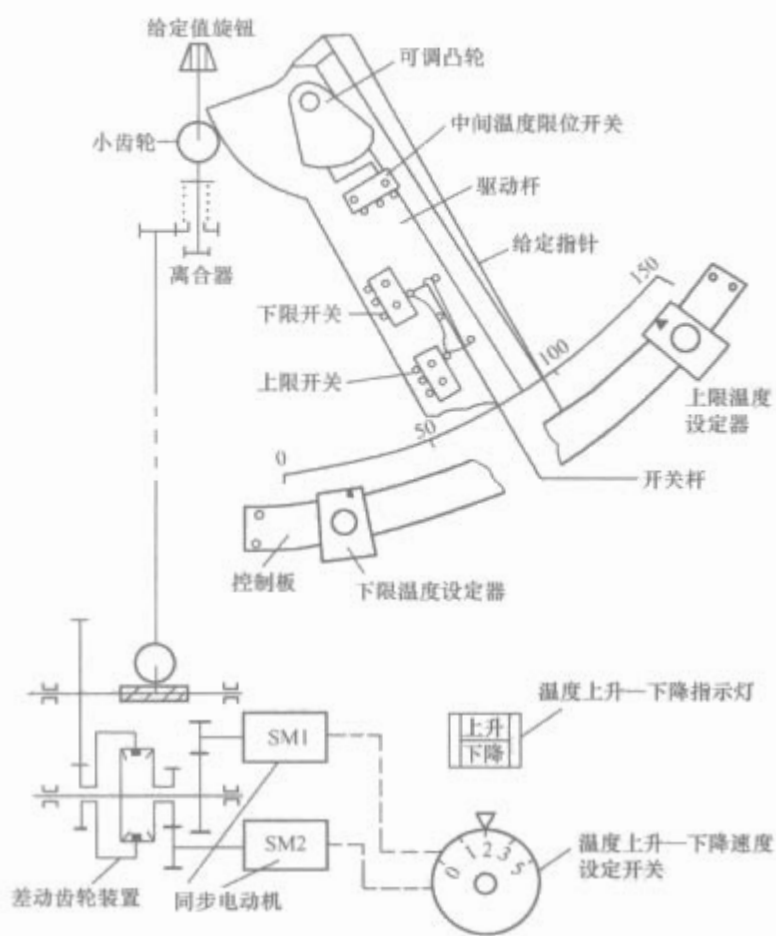


图 7.3-14 温度程序设定装置原理图

表 7.3-4 转动方向及相应的温度给定值

挡位	SM1 转动方向	SM2 转动方向	温度给定值上升速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
0	停转	停转	温度定值控制
1	反转	正转	1
2	正转	停转	1.5
3	停转	正转	2.5
5	正转	正转	4

在燃油温度达到设定的中间温度以前，中间温度限位开关没有被凸轮压下，燃油系统是用柴油工作。当油温升高到设定的中间温度时，中间温度限位开关被可调凸轮压下，使三通电磁阀 2 和三通活塞阀 1 动作，自动切断柴油通路，让重油进入燃油系统。当油温上升到上限值时，开关杆与上限温度设定器相碰，下限开关断开，上限开关闭合，通过控制电路使同步电动机停转，油温给定值不再上升。这时控制系统由温度程序控制自动转为黏度定值控制。

如果要停止系统工作，先把“柴油—重油”转换开关转动到“柴油”位置，同步电动机就以与原来相反的方向转动，温度给定值按原速降低，控制系统由黏度定值控制自动转换为温度程序控制。当油温下降到中间温度时，自动切断重油通路，燃油系统用柴油工作，当油温下降到下限值时，下限开关闭合，上限开关断开，同步电动机停转，控制系统停止工作。

3.2.3 温度—黏度控制选择阀

温度程序调节器和黏度调节器的输出信号都送到温度—黏度控制选择阀，选择阀的输出信号送入蒸汽调节阀控制其开度。当油温低于上限值时，选择阀输出温度程序控制信号；当油温达到上限值时，选择阀输出黏度控制信号。图 7.3-15 为“温度—黏度”控制选择阀的结构原理图。

选择阀是由膜片 9、滑阀 7 和 11、密封环 8 以及限位螺钉 6 等组成。A 接温度程序调节器的输出，B 接黏度调节器的输出，C 是选择阀的输出接到蒸汽调节阀的输入管路。当油温低于上限值时，黏度调节器因未接通气源而没有输出，此时，A 端压力大于 B 端压力，膜片向下弯，上密封环 8 离

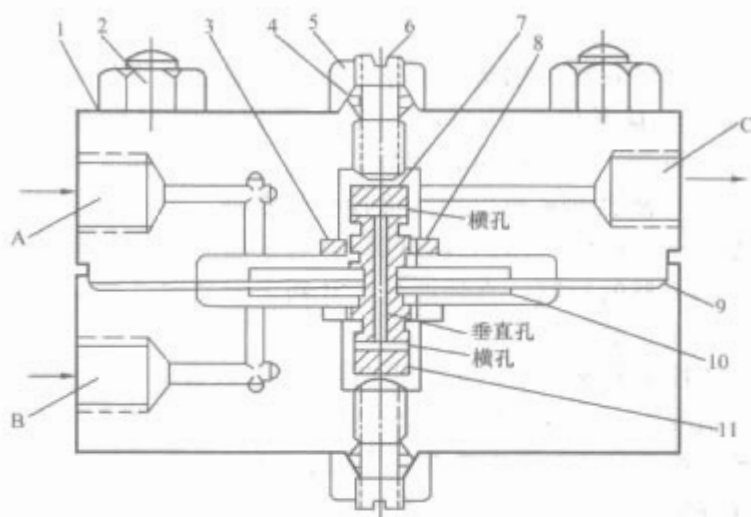


图 7.3-15 温度—黏度控制选择阀

1—阀体；2—螺栓和螺母；3—密封环座；4—O 型密封环；5—螺母；6—限位螺钉；7、11—滑阀；8—O 型密封环；9—膜片；10—硬芯

开上阀座，下密封环落在下阀座上，A 端气压信号经滑阀 7 与上阀座之间的间隙由 C 端输出。对燃油温度进行程序控制。当油温上升到上限值时，黏度调节器因接通气源而有输出，这个气压信号比温度程序调节器输出的信号大，即 B 端压力大于 A 端压力，膜片向上弯，下密封环离开下阀座，上密封环落在上阀座上。因此，B 端信号压力经下阀座与滑阀 11 之间的间隙，滑阀 11 的横孔，垂直孔和滑阀 7 的横孔由 C 端输出，对燃油黏度进行定值控制。

3.2.4 三通电磁阀和三通活塞阀

三通电磁阀和三通活塞阀用于控制“柴油—重油”的自动转换。其结构原理如图 7.3-16 所示。其中图 7.3-16 (a) 是三通电磁阀的逻辑符号图；图 7.3-16 (b) 是三通活塞阀的结构示意图。B 和 C 分别接重油和柴油管路处，A 接三通活塞阀的输出管路。

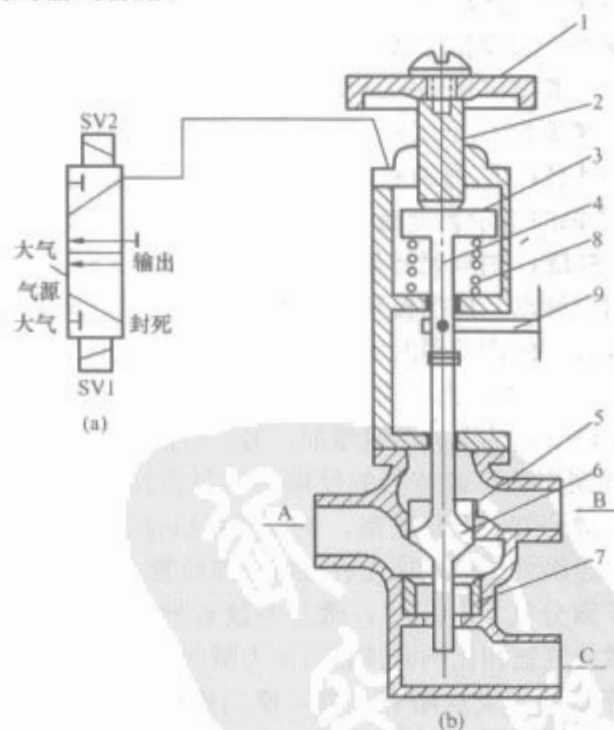


图 7.3-16 三通活塞阀结构原理图

(a) 三通电磁阀；(b) 三通活塞阀

1—手轮；2—限位螺钉；3—控制活塞；4—活塞杆；5—上阀座；6—控制阀；7—下座阀；8—弹簧；9—限位开关杆

当油温低于中间温度时，中间温度限位开关触头没有被压下，电磁阀 SV1 通电，SV2 断电，三通电磁阀为下位，气源被截止，三通活塞阀的控制活塞 3 上部通大气。在弹簧 8 的作用下，活塞 3 连同活塞杆 4 和控制阀 6 一起上移，直

到控制阀 6 落在上阀座 5 为止。这时切断重油管 B 与输出管 A 的通路，而柴油管 C 通输出管 A，些油进入燃油系统。当燃油温度高于中间温度值时，中间温度限位开关被可调凸轮压下，此时三通电磁阀 SV1 断电，SV2 通电，三通电磁阀为上位，气源进入三通活塞阀的活塞 3 的上部空间，使活塞 3 连同活塞杆 4 和阀 6 一起克服弹簧 8 的张力向下移动，直到阀 6 落在下阀 7 上为止。这时，切断些油管 C 与输出管 A 之间的通路，接通重油管 B 与输出管 A 之间的通路，重油进入燃油系统。

三通电磁阀的逻辑功能是 SV1 和 SV2 不可能同时通电，它们中一个通电另一个必定断电。SV2 通电，三通电磁阀上路通。SV1 通电，三通电磁阀下路通。如果 SV1 和 SV2 都断电，三通电磁阀保持原状态。

图 7.3-16 中限位开关 9，用于检测“柴油—重油”转换是否完成。手轮 1 可以进行“柴油—重油”的手动转换。

3.3 VISCOCHIEF 燃油黏度自动控制系统

VISCOCHIEF 型系统是新一代燃油黏度自动控制系统。其黏度传感器 EVT-10C 和控制器 VCU-160 均用单片机取代了常规的变送器和调节器。在系统中可采用 SHS 蒸汽加热装置，也可采用 EHS 电加热装置，或两者兼用。

3.3.1 控制系统的组成、功能及特点

VISCOCHIEF 燃油黏度自动控制系统如图 7.3-17 所示。它主要由 EVT-10C 黏度传感器、PT100 温度传感器、VCU-160 控制器、SHS 蒸汽加热装置和 EHS 电加热装置等部分组成。

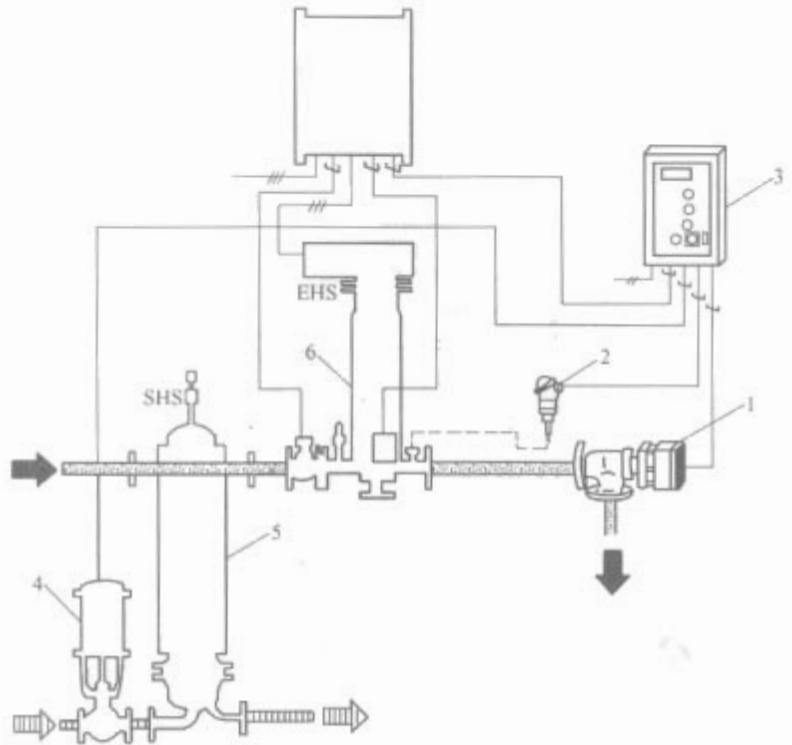


图 7.3-17 燃油黏度自动控制系统原理图
1—EVT-10C 黏度传感器；2—PT100 温度传感器；
3—VCU-160 控制器；4—电动调节阀；5—SHS 蒸汽加热装置；6—EHS 电加热装置等部分组成

黏度传感器和温度传感器分别检测燃油加热器出口燃油的黏度和温度，两者将黏度和温度值按比例转换成标准电流和电压信号送到控制器。VCU-160 型控制器是一种具有比例积分控制规律的全自动控制装置，可以对燃油黏度或温度进行定值控制，有柴油温度定值控制和重油黏度定值控制两种操作方式。系统既可以遥控，又可以进行现场自动控制，必要时经转换也可手动控制。用数码显示器可以同时显示系统中燃油的黏度和温度值，另外也可显示参数设定值和故障

种类。
3.3.2 测量单元
EVT-10C 型黏度传感器由测粘计和单片机变送器两部分组成，其结构原理如图 7.3-18 所示。

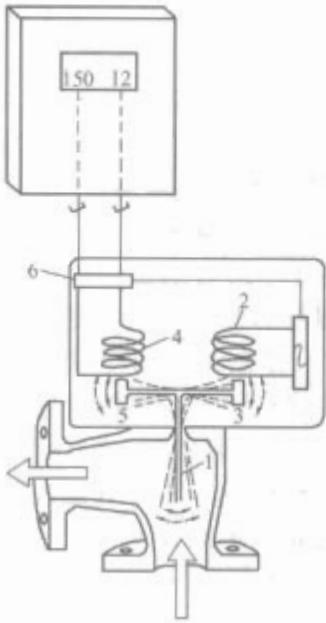


图7.3-18 EVT-10C 型黏度传感器结构原理图
1—振动杆；2—动力线圈；3、5—永久磁铁；
4—检测线圈；6—单片机系统

3.3.2.1 测粘计

测粘计是燃油黏度的测量装置，它把燃油黏度的变化转换为感应电动势的变化量并送到单片机变送器。测粘计的主要部件是振动杆 1、动力线圈 2、永久磁铁 3、检测线圈 4、永久磁铁 5 等。工作原理是基于插入到流动燃油里振动杆的强制振荡进行测量的。振动杆的强制振荡是由动力线圈 2 和永久磁铁 3 产生并保持的，其振荡频率是固定的。振动杆的自振频率取决于振动杆的几何尺寸。当设计的振动杆几何尺寸使其自动频率等于强制振荡频率时，将发生共振。在这个振荡频率上，振动杆的振荡幅值达最大。燃油的摩擦阻力将衰减振动杆振荡的幅值，振动杆的幅值衰减量正比于燃油黏度。在测量管路里流过燃油的黏度越高，振动杆振荡受到的衰减越大，杆的振荡幅值越小。反之，黏度越低，衰减量越小，杆的振荡幅值越大。通过固定在振动杆上的永久磁铁 5 和在其上方的检测线圈 4 进行测量振动杆的振荡幅值。检测线圈内感应电动势的下降量与振动杆振荡幅值的衰减量成正比。

振荡电路的共振频率，即动力线圈电源的频率在制造时已被调准，并把这个频率值储存在单片机系统 6 内。在工作期间，单片机随时对这个频率进行检查核对是否保持在特定范围内。传感器的校准是在工厂里用三种不同黏度（10m²/s，20m²/s，50m²/s）专用高等级标准油样进行黏度值标定的，从测量线圈检测到毫伏信号作为毫伏输出曲线储存在单片机系统里。

3.3.2.2 单片机变送器

黏度传感器内的单片机变送器采用英特尔（Intel）公司 MCS-51 系列单片机 80C31 组成单片微型计算机变送系统，电路如图 7.3-19 所示。它把测量线圈产生的感应电动势经

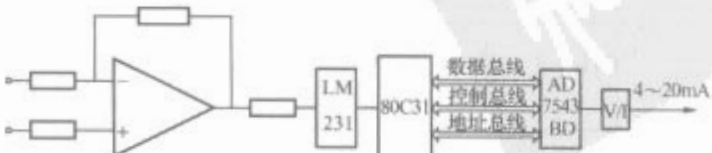


图 7.3-19 单片机变送器电路原理

数据放大后送入精密电压—频率转换器 LM231, 它输出的脉冲信号频率与输入电压严格成比例, 实际上 LM231 是起模/数转换器的作用。该脉冲信号 80C31 内部定时器 T_0 , 记录单位时间脉冲数, 该数值就反映了燃油黏度的实际值。为了防止振动、温度、流量、压力、流速等外界因素的干扰, 软件上采取了数字滤波等抗干扰措施, 并进行数值标定。80C31 再把表示黏度值的数字量送入 AD7543BD 数/模转换器转换成电压模拟量, 经电压电流变换电路转换成标准 4~20mA 电流输出, 其对应的黏度测量范围是 0~50m²/s。

3.3.3 VCU—160 黏度控制器

VCU—160 黏度控制器用单片机 8031 可以同时监视、控制、显示燃油温度和黏度, 它主要由 PI 温度调节器和 PI 黏度调节器组成。控制和显示所用的输入信号来自于 EVT—10C 黏度传感器和或电加热装置的接触器。可以对 DO (柴油) 进行温度定值控制, 对 HFO (重油) 进行温度或黏度控制, 两种控制方式在升温或降温过程中有升温速率的程序和降温黏度定值控制, 另外设有手动控制蒸汽调节阀调节方式。在各种工作模式下均有温度和黏度显示。

当把控制方式选择开关从停止转到 DO 位置 (温度控制) 时, 开始对柴油进行加热, 温度升高的速率是按事先设定的规律进行程序控制的, 当温度达到设定的 DO 定值控制温度以下 3℃ 之内时, 加温过程的程序控制结束, 自动转入温度定值控制, 此时黏度警报被自动关掉。

当把控制方式选择开关从停止或柴油位置转到 HFO 位置 (黏度控制) 时, 升温过程与 DO 工作方式升温过程相同, 只是当温度达到 HFO 设定温度以下 3℃ 之内时, 自动转入黏度定值控制, 同时闪亮的 DO 工作指示灯灭, HFO 工作指示灯亮。工作状态稳定后, 改为对 HFO 进行温度或黏度的定值控制。当黏度被控制到给定值与测量值的绝对偏差在 0.5m²/s 以内时, 温度调节器开始以黏度设定值所对应的当时温度值作为温度给定值, 对 HFO 进行温度定值控制, 只要黏度保持绝对偏差在 0.5m²/s 以内, 温度调节器就一直输出控制信号, 使系统温度保持在当时温度上。当黏度绝对偏差值超过 0.5m²/s 时, 黏度调节器开始工作, 使其恢复到绝对偏差在 0.5m²/s 以内时, 温度调节器又以此时黏度所对应的温度为给定值进行温度定值控制。定值控制用的比例积分作用规律和程序控制功能均由软件程序来完成。控制过程曲线如图 7.3-20 所示。从曲线上可看出, 某燃油黏度的给定值为 12m²/s, 当燃油实际黏度达 12m²/s 时的温度是 150℃, 根据前面所述可知, 这时应为温度定值控制。随着主机用油品种或油质的变化, 在时间 T_1 时燃油实际黏度已变化到 $12.5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 黏度偏差已达 0.5m²/s, 黏度调节器开始工作, 执行机构改为按黏度调节器输出的控制信号动作, 使黏度逐渐向给定值方向恢复。当时间刚过 T_2 时, 实际黏度已回到 12.5m²/s 以下, 这时的燃油温度为 154℃,

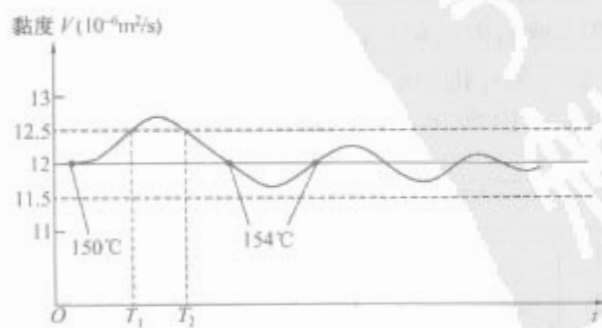


图 7.3-20 黏度控制过程曲线

温度调节器又以 154℃ 为温度给定值进行温度定值控制。此后, 只要实际黏度值与给定值的绝对偏差不超过 0.5m²/s, 就一直保持在这个温度上的温度定值控制, 若绝对偏差超过 0.5m²/s, 调节器将重复上述动作过程。当把控制方式开关从重油位置转到柴油位置时, 系统将连续工作在柴油黏度定值控制方式, 控制器通过减小对燃油的加热强度来保持黏度值, 当温度下降到柴油温度设定值时, 温度调节器自动开始温度控制。

4 自清洗过滤器自动控制系统

现代自动化船舶上广泛应用的自清洗过滤器主要有两种清洗形式: 气体辅助自动反冲洗过滤器和自身液流自动反冲洗过滤器。两种自清洗过滤器都能在不中断过滤运行的情况下进行自动反清洗, 可保证滤液的连续供给。

4.1 自身液流自动反冲洗过滤器

自身液流自动反冲洗过滤器利用自身过滤出的清液, 自动反冲洗滤芯, 滤器的清洗、排污过程是在设备运行过程中自动进行的, 反冲时逐一清洗每对滤芯, 其他滤芯仍在连续过滤, 可保证滤液的连续供给。图 7.3-21 所示是一种自身液流自动反冲洗过滤器, 主要应用于润滑油的过滤, 它由排污电磁阀、驱动电动机、烛插式滤芯、冲洗臂、旋转盖臂、中央直立式导管、过滤室等部件组成。若干个烛插式滤芯排列成两个同心圆, 被固定在滤芯支架上, 自清洗过滤器自运行过程中总有两个滤芯处于冲洗模式或备用状态, 其余滤芯处于过滤模式。

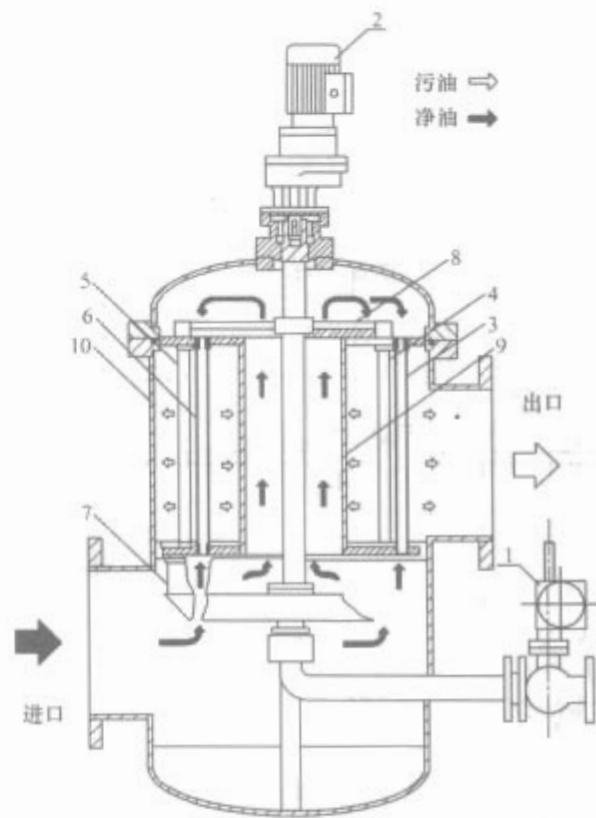


图 7.3-21 自身液流自动反冲洗过滤器过滤原理

1—排污电磁阀; 2—驱动电动机; 3~6—烛插式滤芯; 7—冲洗臂; 8—旋转盖臂; 9—中央直立式导管; 10—过滤室

4.1.1 过滤模式

在过滤模式下, 待过滤油从过滤器进口法兰到达过滤室的底部, 如图 7.3-21 所示。大约 50% 待过滤油通过中央直立式导管被引导到过滤室的顶部, 然后向下流入烛插式滤芯的上部开口端。另外 50% 待过滤油由过滤室的底部

向上流入烛插式滤芯的下部开口端。过滤后的油从滤芯内部通过滤芯的间隙流出，杂质污物残留在滤芯内部的整个长度区间内，从而使得烛插式滤芯的过滤区域得到充分利用。

4.1.2 冲洗模式

随着残留在烛插式滤芯内部杂质污物的增多，过滤器进出口之间的压差逐渐升高。当进出口压差达到设定值（如 0.06MPa），反冲洗系统被触发起动，驱动电动机带动位于烛插式滤芯上方的旋转盖臂和位于烛插式滤芯下方的冲洗臂开始转动。当旋转盖臂对准下一对烛插式滤芯时，旋转盖臂把两个滤芯的上部开口端盖住，此时冲洗臂恰好对准滤芯下部开口端位置，排污电磁阀获电打开。这样，切断了这两个滤芯的上下部进油口，过滤后的油从滤芯外部反向流入内部，在滤芯内部形成高速轴向液流，如图 7.3-22 所示。另一方面，滤芯内部的压力梯度只允许少量的油从滤器上部

反向回流。旋转盖臂上的节流阀位于滤芯上方，形成减速的横向流动的反冲洗，使反冲洗能量平均分布在滤芯的整个长度区间内。纵向和横向反冲洗同时作用，使滤芯的整个长度区间均衡清洗，达到了最佳的反冲洗效果。

4.1.3 控制系统

图 7.3-23 所示是用于两台并联过滤器的控制系统，核心单元是一只富士 BN0-P24R3-AC 可编程控制器（PLC）。NB0-P24R3-AC 主机具有 13 点 DC24V 输入、11 点继电器（2A）输出和两个内置模拟定时器，是一种超小型的 PLC。按钮 SB11（SB12）分别用于过滤器的手动冲洗。当进出口压差达到设定值时，差压开关 DPS1（DPS2）动作，PLC 触发冲洗过程，SA11（SA12）获电吸合，驱动电动机起动。当冲洗臂和旋转盖臂对准下一对滤芯时，排污电磁阀 S11（S12）获电打开，指示灯 HL31（HL32）被点亮，开始一次反冲洗。冲洗持续时间由内置模拟定时器确定，在 0~20s 之间连续可调。当进出口压差过大时，差压开关 DPA1（DPA2）动作，S5 获电动作，指示灯 HL5 点亮，发出报警信号。待故障消除后，按一下 SB11（SB12），进行复位。冲洗频度过高时同样会使 S5 获电动作，发出报警信号。当驱动电机过载时，热继电器 K21（K22）动作，HL21（HL22）被点亮。冲洗计数器 HL4 记录过滤器自动冲洗的次数。

4.2 气体辅助自动反冲洗过滤器

在气体辅助自动反冲洗过滤器中，外部压缩空气高速反向穿过（由内而外）过滤元件，其速度是正向正常流速的数倍，有效地把聚积在滤芯上的污物冲除。图 7.3-25 所示是一种气体辅助自动反冲洗过滤器，主要用于船舶燃油的过滤。该过滤器由六个过滤腔室、烛插式滤芯、旋转机构、排污活塞、差压开关、驱动电动机、空气泄放阀、电磁阀、活塞阀、储气罐等部分组成。在正常运行过程中，自清洗过滤器有五个过滤腔处于过滤模式，另外一个过滤腔处于冲洗模式或处于已冲洗过的备用状态。

图 7.3-22 自身液流自动反冲洗过滤器冲洗原理

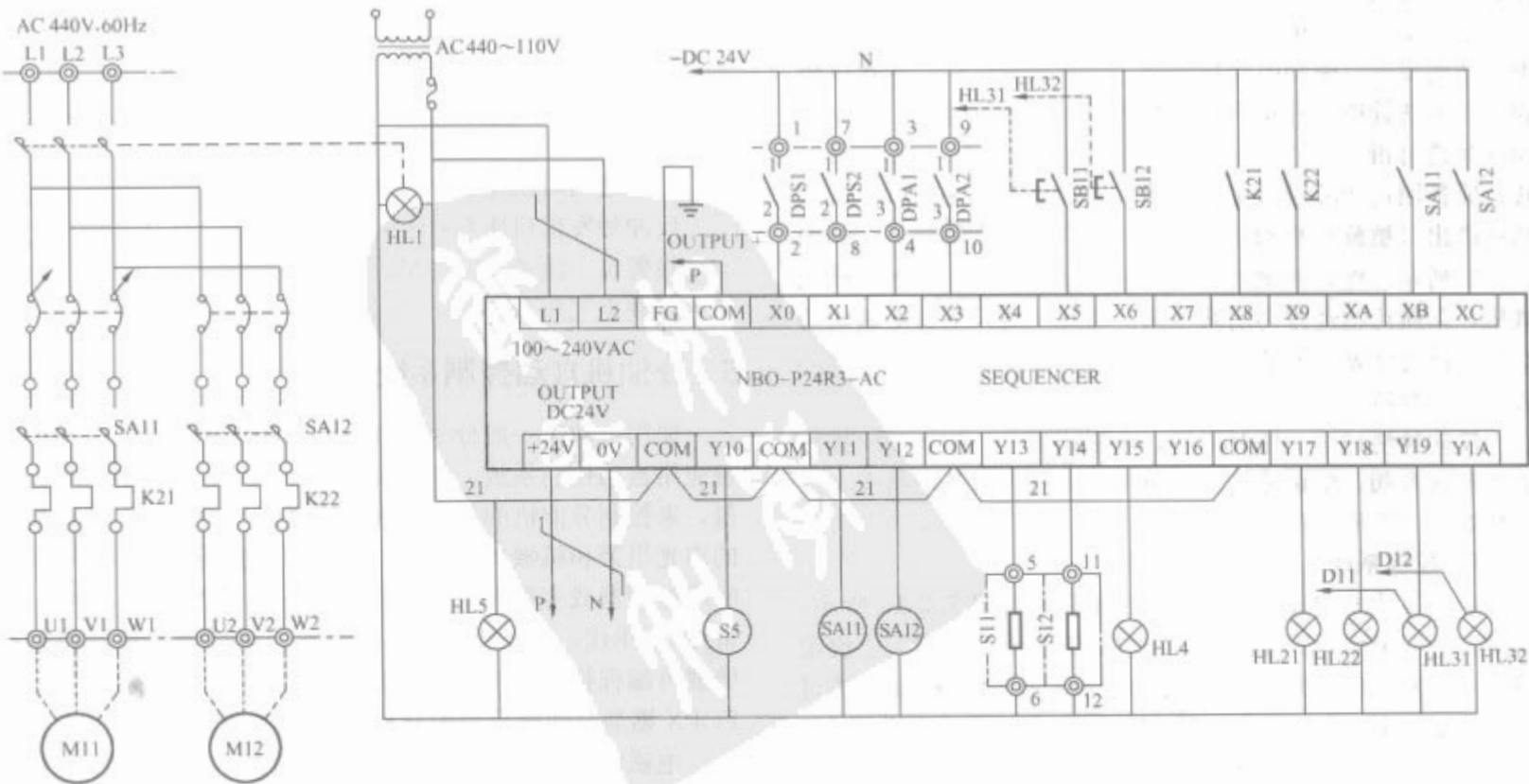


图 7.3-23 自身液流自动反冲洗过滤器控制系统

4.2.1 过滤模式

待过滤燃油从进口法兰通过过滤腔入口，由烛插式滤芯的外部进入其内部，杂质污物残留在滤芯外部，洁净燃油经过滤腔出口流出，如图 7.3-24 所示。此时，电磁阀失电，0.5MPa 的压缩空气使排污活塞关闭，活塞阀不受控关闭，储气罐充足压缩空气，为反冲洗做好准备。

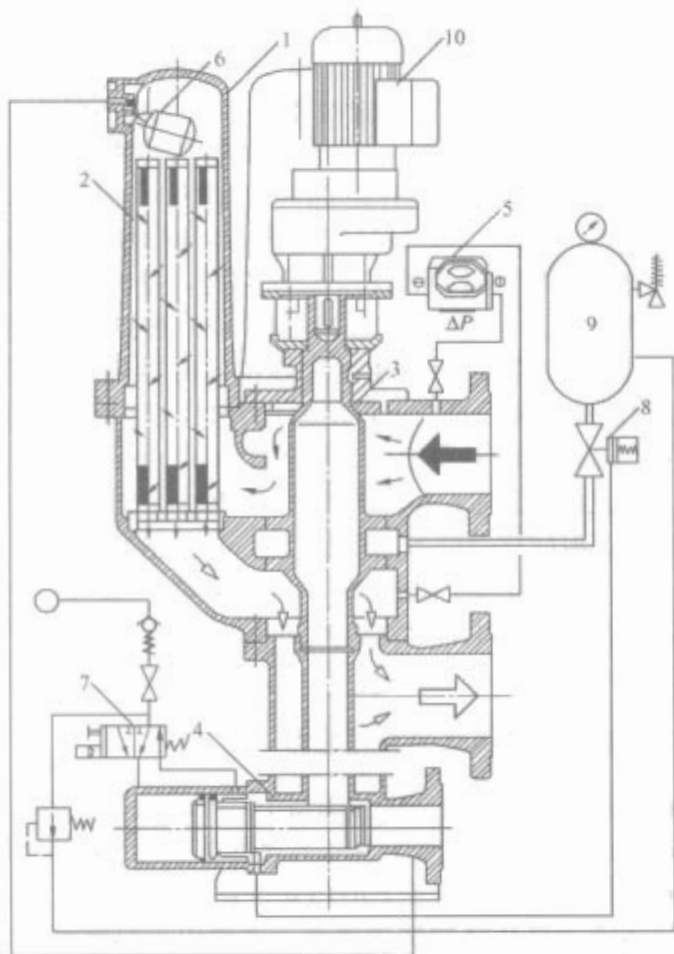


图 7.3-24 空气反冲式自清洗过滤器过滤原理

- 1—过滤腔室；2—烛插式滤芯；3—旋转机构；
4—排污活塞；5—差压开关；6—泄放阀；
7—电磁阀；8—活塞阀；9—空气储气罐；
10—驱动电动机

4.2.2 冲洗模式

在过滤过程中，滤芯外部的杂质污物逐渐增加，自清洗过滤器的燃油进出口压差不断升高。当进出口压差达到某一设定值（如 0.06MPa）时，差压开关动作，自清洗过滤器进入冲洗模式，驱动电动机起动，带动旋转机构，旋转机构的反向冲洗管道离开备用过滤腔转向下一个过滤腔。当反向冲洗管道对准下一个过滤腔时，限位开关动作，电动机停转，原备用过滤腔投入工作。旋转机构切断待冲洗过滤腔的燃油进出口被旋转机构切断，而与反向冲洗管道连通，如图 7.3-25 所示。电磁阀通电，打开排污活塞，滤芯外部骤然减压，杂质污物经排污活塞排出。与此同时，来自电磁阀的空气经排污活塞打开活塞阀，释放储气罐中的空气，对滤芯进行反向冲洗。

反向冲洗持续一段时间后，电磁阀失电，依次关闭排污活塞和活塞阀，结束冲洗。干净的过滤腔进入备用状态，洁净燃油通过溢流小孔注入其中。

4.2.3 控制系统

空气反冲式自清洗过滤器控制系统如图 7.3-26 所示，其核心是一个嵌入式控制器。当过滤器进出口压差大于设定的冲洗压差值时，压差开关的动合触点闭合，触发冲洗过程，接触器 K1 获电动作，其主触头闭合，驱动电动机 M1 转动。旋转机构的反向冲洗管道从备用过滤腔转向下一个过滤腔，当对准下一个过滤腔时，限位开关 SV 动作，接触器

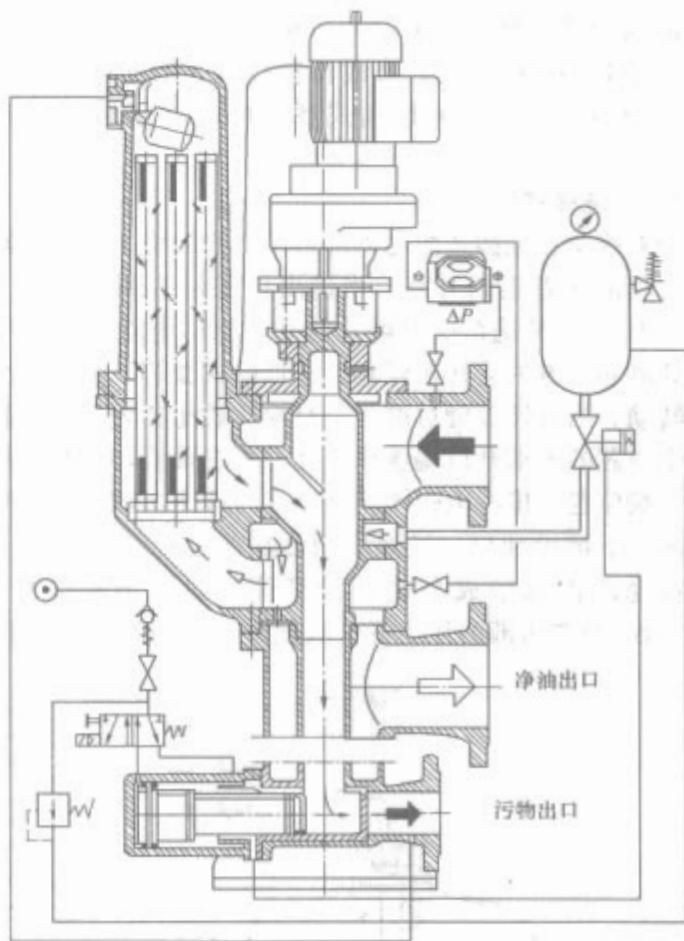


图 7.3-25 空气反冲式自清洗过滤器冲洗原理

K1 失电，电动机停转，电磁阀 Y1 获电打开，进入冲洗过程。经过一段时间（如 60s）的持续冲洗，电磁阀 Y1 失电，结束一个过滤腔的冲洗。冲洗持续时间 5~100s 连续可调。由于某种原因，过滤器进出口压差大于冲洗压差值得 125% 时，压差开关的动断触点断开，控制系统发出报警信号。

A1 用于控制系统电源电压异常报警信号的输出；A2 用于进出口压差过高和驱动电动机过载报警信号的输出；A3~A5 用于冲洗状态信号输出。

4.3 主要技术指标

以燃油自清洗过滤器 MISUZU-BOLL6.61 为例：
过滤介质：重油（460m²/s，50℃）。
过滤能力：22m³/1h。
燃油黏度：10~15m²/s。
燃油温度：最大 150℃。
燃油压力：正常 0.98MPa，最大 1.08MPa。
初始进出口压差：小于 0.02MPa。
反冲触发出口压差：0.06MPa。
报警出口压差：0.08MPa。
控制空气压力：0.6~0.7MPa。

5 分油机自动控制系统

船用分油机一般分为重油分油机和滑油分油机，两者普遍应用自动控制系统，通过检测经分离过的净油中的水分含量，来控制分油机的排水阀和排渣阀的正确起闭，控制相应的声光报警和机械故障停机。早期的控制系统通常采用凸轮时序控制器或多回路时间继电器为核心进行设计，进入 20 世纪 80 年代，分油机控制系统基本上采用微处理器控制系统或可编程控制器系统。如图 7.3-27 所示为应用较为广泛 FOPX 燃油分油机自动控制系统组成原理图。

电磁阀 MV16 控制补偿水和密封水，正常分油期间，该电磁阀断续通电打开，工作水箱的水经 P2 管断续向滑动

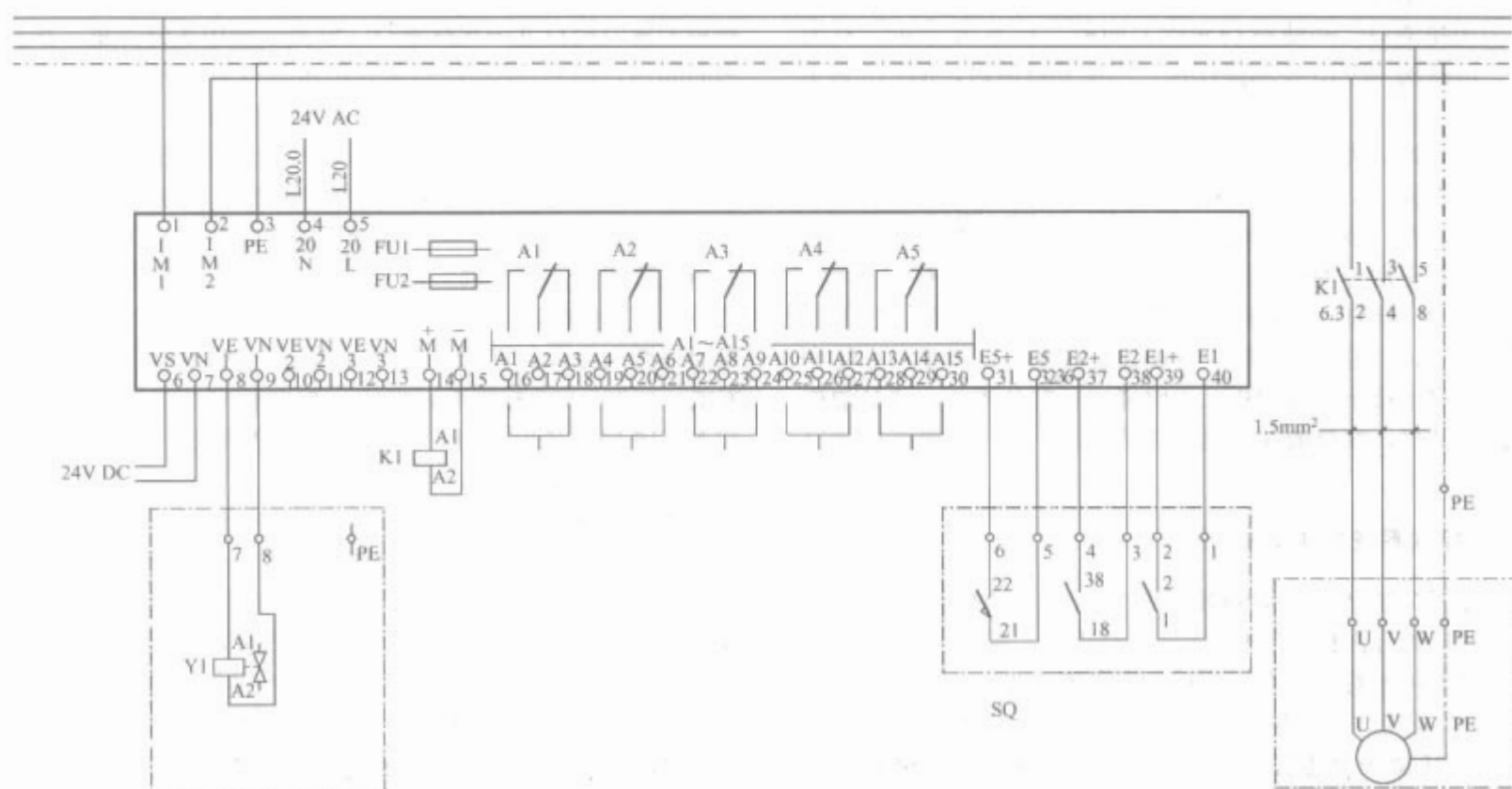


图 7.3-26 空气反冲式自清洗过滤器控制系统

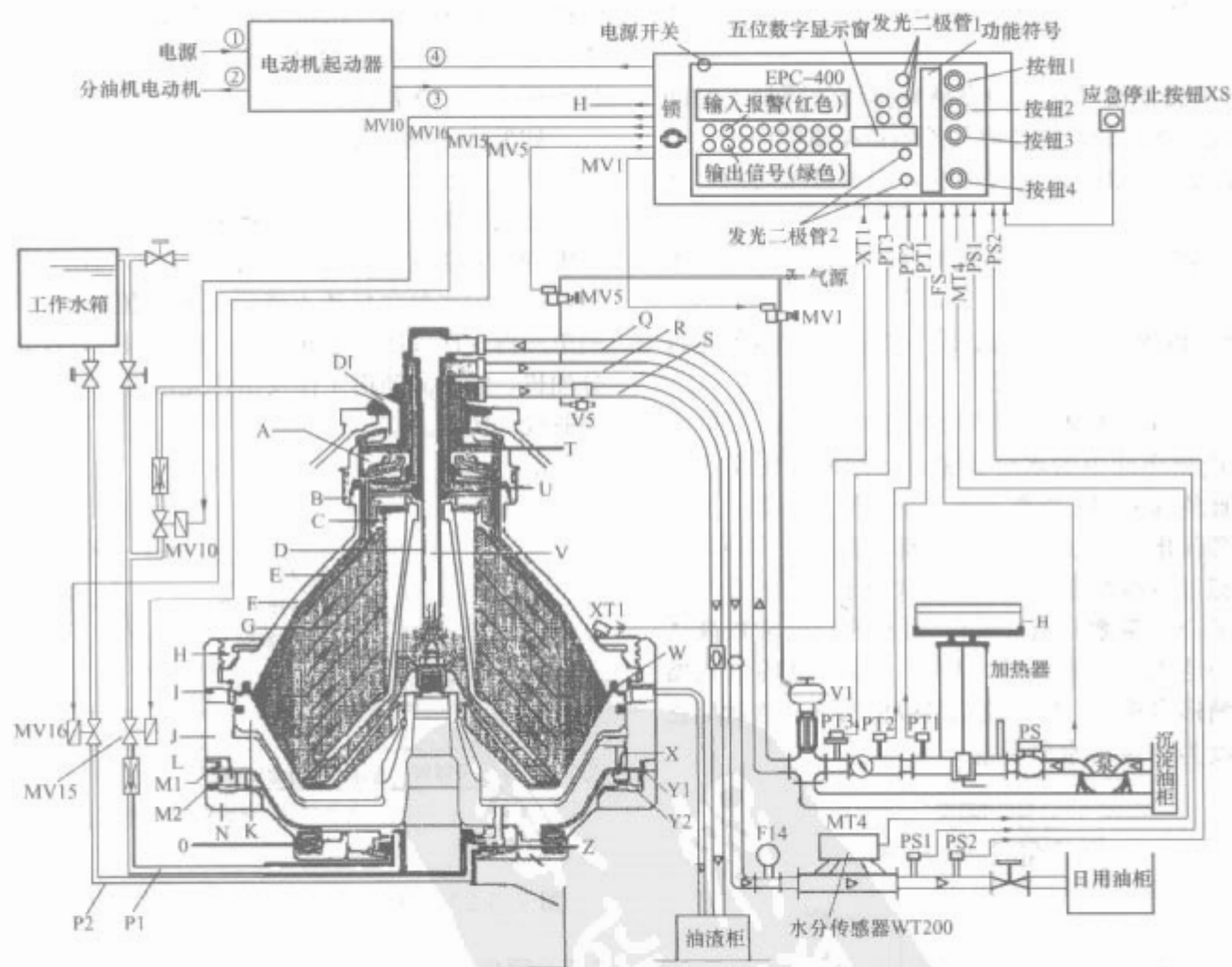


图 7.3-27 FOPX 燃油分油机自动控制系统组成原理图

A—流量控制盘；B—小锁紧圈（带水腔盖）；C—液位环；D—配油器；E—顶盖；F—分离筒盖；G—分离筒组；H—大锁紧圈；I—排渣口；J—分离筒本体；K—滑动底盘；L—滑动圈；M1、M2—喷嘴；N—定量环；O—弹簧；P1—开起工作水进口；P2—密封和补偿水进口；Q—进油口；R—净油出口；S—水出口；T—向心水泵；U—向心油泵；V—进口口；W—分离筒盖密封环；X—泄放阀；Y1、Y2—开起密封水腔；Z—配水盘；DI—置换/调节水进口；MV1、MV5、MV10、MV15、MV16—电磁阀；PS—压力开关；PT1、PT2—温度开关；PT3—温度传感器；FS—流量开关；XT1—（液体）温度传感器；V1—三通活塞阀；F14—流量表

底盘 K 下面的工作空间进补偿水。保证滑动底盘托起,牢牢关闭排渣口,并使滑动底盘下面的工作水维持在 Z 孔附近。电磁阀 MV15 控制操作水,当需要排渣时, MV15 通电打开 3s,由 P1 向分油机进操作水,滑动底盘下落 0.1s 打开排渣口,然后再自动托起密封排渣口实现一次排渣。在排渣口密封期间, MV15 保持断电。电磁阀 MV5 是排水电磁阀,需要排水时,该电磁阀通电约 20s,压缩空气把 V5 阀打开排水,在正常分油期间或在排渣期间该电磁阀均断电关闭。

FOPX 分油机有两种排放方式:①通过分离筒周围的排渣孔排出;②通过分离筒上部的流量控制盘、排水向心轮和排水阀将水排出。分油机工作时能进行部分排渣,待分油连续进分油机,在排渣期间也不切断进油,每次排渣其排渣口仅打开 0.1s。

5.1 控制系统的主要单元

如图 7.3-28 所示, FOPX 型分油机自动控制系统由不带比重环的分油机、 EPC—400 控制单元、 WT200 水分传感器、温度传感器、压力开关和电磁阀等组成。

(1) EPC—400 控制单元。 EPC—400 控制单元是一个基于 8031 微处理器的嵌入式控制系统,实现分油机的监测和控制功能。概括起来, EPC—400 控制单元完成下列任务:

- 1) 在正常分油期间,每隔 6s 采集一次水分传感器信号,控制从分离筒分离出的水的排泄,以达到最佳分离效率。
- 2) 当水分传感器信号达到触发值或排渣间隔最大时间超过之后,触发一次排渣,并监测和控制该排渣顺序。
- 3) 决定是否需要加水、何时加水、加水持续时间,从而控制加水量。
- 4) 对待分离燃油温度进行比例积分控制,自动调节燃油的温度。
- 5) 显示燃油温度、水分含量、距下次排渣时间等运行参数。

(2) WT200 水分传感器。净油出口管路上的 WT200 水分传感器用于检测净油中的水分含量,其结构如图 7.3-28 所示。两根彼此绝缘的同心圆管组成一个圆筒形容器,分离后的净油经容器流出。水分传感器的内部振荡器产生频率固定的交流电,流过容器电流的大小完全取决于电容的介电常数。纯矿物油的介电常数只有 2~4,而水的介电常数高达 80,净油中水分含量的微量增加,导致流过容器的电流增大。因此,圆筒形容器输出的电流信号幅值与水分含量成正比,其检测精度为 0.05% 水分含量。

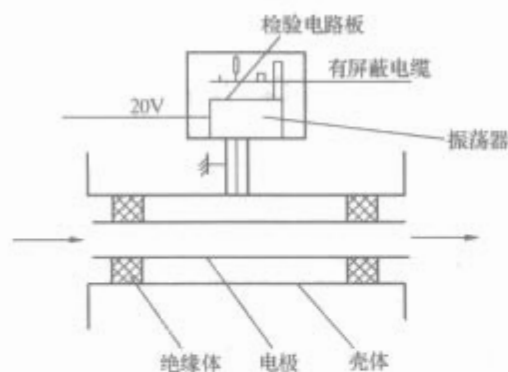


图 7.3-28 WT200 水分传感器结构原理图

5.2 自动排渣排水顺序控制

EPC—400 控制单元设置了一个最短排渣时间间隔 (一

般为 10min) 和一个最长排渣时间间隔 (一般为 63min),以哪种间隔时间打开一次排渣口,取决于油中水分含量。在参考时间内, EPC—400 控制单元把水分含量信号存储在读写存储器 RAM 中,作为净油水分含量的参考值。

如果待分油中水分含量极低,经过最长排渣时间间隔后分离出的水不能达到分离盘,净油中水分含量达不到触发值,这时 EPC—400 控制单元触发排渣顺序,以防分离筒中泥渣过渡积累。排渣前, EPC—400 控制单元输出一个控制信号,打开电磁阀 MV10,向分油机内注入置换水。油水分界面逐渐向分离盘移动,大约 20s 后净油中水分含量达到触发值, EPC—400 控制单元将输出控制信号使电磁阀 MV15 和 MV16 同时通电打开,进行一次排渣程序,该过程如图 7.3-29 中的曲线 1 所示。

如果待分油中含有一定量的水,经过最短排渣时间间隔但不到最长排渣时间间隔,分离出的水达到了分离盘,净油中水分含量就达到触发值, EPC—400 控制单元会触发一次排渣顺序。由于分离盘外侧已有足够的水量,所以排渣前不用注入置换水,该过程如图 7.3-29 中的曲线 2 所示。

如果待分油中水量较多,距上次排渣后的最短排渣时间间隔内,净油中的水分含量就达到触发值, EPC—400 控制单元发出一个控制信号使排水电磁阀 MV5 通电,打开 V5 阀向外排水,油水分界面不断外移,净油中的水分含量迅速下降,一般排水阀打开 20s 后关闭,该过程如图 7.3-29 中的曲线 3 所示。若一次排水后,在最短排渣时间间隔内净油中水分含量又很快达到触发值,则 EPC—400 控制单元关闭排水阀进行一次排渣。

如果待分油中含有大量的水,较短的时间内净油中水分含量就达到触发值,且排水阀打开 120s 后净油中水分含量仍未能低于触发值,排水阀被关闭进行一次排渣。排渣后净油中的水分含量又较快地增至触发值,且打开排水阀 120s 后,净油中水分含量还不能降到触发值以下, EPC—400 控制单元再一次关闭排水阀进行一次排渣后,停止待分油进入分油机,停止分油机工作发出声光报警。该过程如图 7.3-29 中曲线 4 所示。

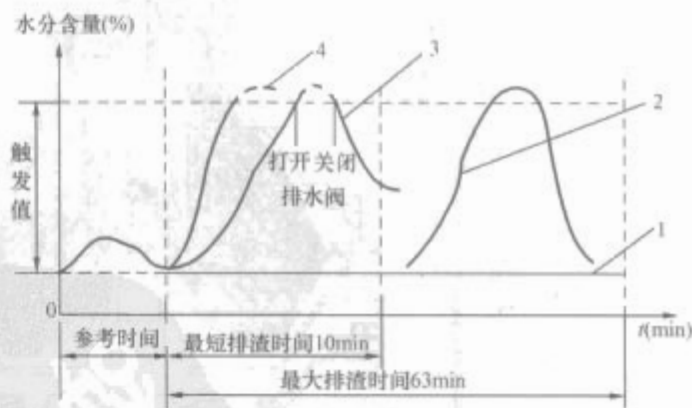


图 7.3-29 待分油中不同水分含量的排水和排渣情况

5.3 程序时刻表

要使分油机投入工作,首先按起动器上的起动按钮,起动分油机的电动机,接通 EPC—400 控制单元面板上的电源开关,起动燃油加热器。待分油机电机稳定运行一段时间后,按控制箱面板上的起动/停止程序按钮,如果燃油温度达到正常值, EPC—400 控制单元将对分油机进行正常分油、排水和排渣等程序操作。表 7.3-5 列出了 FOPX 型分油机在 EPC—400 装置控制下起动、运行、排渣、停止程序的时刻表。

表 7.3-5 程序时刻表

FOPX ALCAP 型		停止	运 行						停 止				
电磁阀继电器	作用功能	准备	T ₁ 起动时间			T ₂ 排渣间隔时间	D ₁ 排渣		T ₂	D ₂ 停止程序			准备
			T ₀	T _{1A}	T _{1B}		T ₄	T ₅			T ₃	T ₄	
	固定时间 (s)	15		30		3	15		15	3	180		
	可调时间 (s)												
MV1	待分油进分油机												
MV10	置换水												
MV15	开起水												
MV16	补偿水和密封水					--			--				
K5	起动器												
Heater	加热器												

5.4 油温控制与工况监测

温度传感器 PT3 检测待分燃油的实际温度，EPC—400 控制单元利用内置的 PI 调节器实现油温自动控制，保证分油机的分离效果。温度开关 PT1 用于高温报警；温度开关 PT2 用于低温报警。

FS 是流量开关，监视供油系统进油量。一旦供油系统的进油量降至下限值时，FS 闭合，EPC—400 控制单元发出低流量报警。

当分油机发生跑油故障时，净油出口管路上的压力开关 PS1 闭合，EPC—400 控制单元发出分油机故障报警并停止分油机工作。

压力开关 PS2 监测排渣口是否排渣。在排渣时，滑动底盘 K 下落打开排渣口，分离盘外侧空间的水和泥渣立即从排渣口排出，净油出口压力会迅速下降，PS2 闭合，说明排渣口已经打开，正在执行排渣顺序。如果 EPC—400 控制单元触发排渣顺序后 PS2 不能及时闭合，说明分油机不能排渣。这时 EPC—400 控制单元撤消排渣信号，数秒后第二次发出排渣信号，如果仍收不到排渣口打开信号，EPC—400 控制单元将发出分油机排渣故障的报警并终止运行。

XT1 是装在排渣口的温度传感器。在正常分油期间，排渣口不应该有液体流出，XT1 检测到的温度较低，如果检测到的温度较高，说明排渣口密封不严，有液体流出，则 EPC—400 控制单元发出报警信号。

5.5 主要技术指标

- 以 AlfaLaval SA875 重油分油机为例：
- 分油能力：10.9m³/h (98℃)。
- 最大密度：1010kg/m³ (15℃)。
- 最大黏度：55m²/s (100℃)。
- 进口油压：0.20MPa。
- 出口油压：0.25MPa。
- 燃油温度：(98±2)℃。
- 环境温度：5~55℃。
- 工作水压力：0.2~0.6MPa。
- 工作水温度：5~55℃。
- 控制空气：0.5~0.7MPa。

6 油水分离器自动控制系统

船舶舱底水中混有各种油类、淤泥、杂质和其他沉积物。这种污水，特别是含油类较多的污水如果不加处理直接

排放至船外，会造成航行水域和停泊水域的严重污染。国际海事组织 (IMO) MARPOL73/78 防污公约规定：凡总吨 10 000t 及以上的任何船舶，应装有滤油设备和当排出物的含油量超过 15×10⁻⁴% 时能发出报警并自动停止含油物排放的装置。

目前，安装在船舶上的油水分离器，主要是利用物理处理方法，将污水中的油分分离出来。它的自动控制任务包括水中含油浓度的监测、浓度超标报警、分离后满足标准的污水排出舷外以及被分离出来的污油自动排放到污油柜中等。

6.1 油水分离系统的组成

6.1.1 油水分离系统的组成

图 7.3-30 所示为典型的船舶油水分离系统组成原理图。整个油水分离系统主要由污水柜、污水泵、油水分离器、污油柜、油分浓度监测报警器、三通电磁阀和气动三通球阀组成。

在油水分离器正常工作期间，污水泵 (bilge pump) 将待分离污水从污水柜 (bilge tank) 抽至油水分离器。经过油水分离器分离处理的污水从分离筒的底部排出，由油分浓度检测报警器 (bilge alarm) 测定其中的含油浓度。当水中

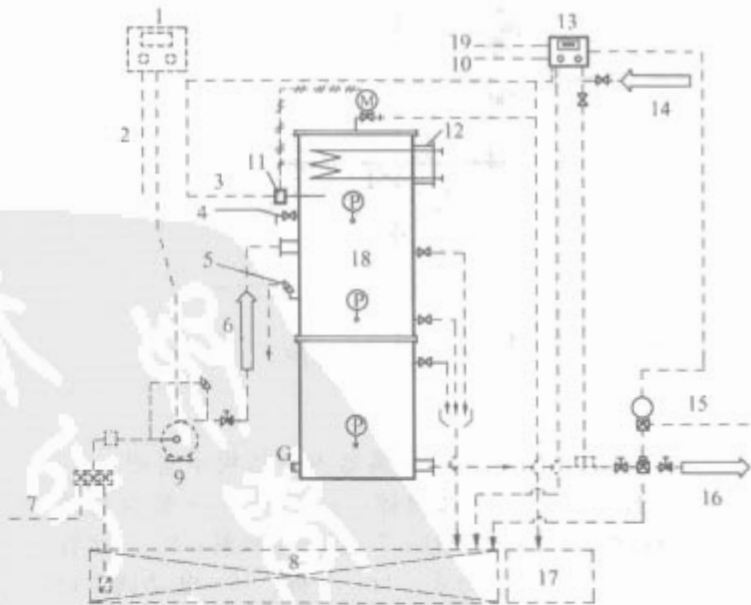


图 7.3-30 油水分离系统

- 1—控制箱；2—电源；3—传感器电源；4—测试阀；5—安全阀；6—污水进口；7—海水；8—污水柜；9—污水泵；10—电源；11—油位传感器；12—蒸汽加热器；13—报警单元；14—淡水进口；15—气源；16—污水出口；17—污油柜；18—分离筒；19—报警信号。

含油浓度低于 $1515 \times 10^{-4} \%$ 标准时,三通电磁阀获电,气动三通阀去舷外的通路被打开,将经过分离处理的污水排至舷外。一旦水中含油浓度超过 $1515 \times 10^{-4} \%$ 标准时,监测报警器发出报警信号,同时三通电磁阀失电,气动三通阀关闭去舷外的通路,停止向舷外排水,经分离处理的污水回至污水柜。

6.1.2 油水分离原理

目前船舶上采用的油水分离方法主要有如下几种:

1) 流道分离法。将污水流过多层平行板、波纹板以及锥形板等结构,从而形成螺旋流动、曲折流动,增加碰撞和聚合的机会,形成较大的油滴上浮分离。

2) 过滤分离法。将污水通过多孔介质时,油滴中心与多孔介质表面的距离小于或等于其自身半径时,油滴被截流筛分。

3) 聚合分离法。油滴在拦截、扩散等多种机理作用下迁移到多孔介质表面,并在其上铺展、聚合,当油滴聚合到一定大小时,在水动力、浮力及毛细管力的作用下被推动向前,最终剥离并以大油滴的形式脱离多孔介质表面,上浮与水分离。

4) 吸附分离法。吸附分离法是,利用大表面积多孔性的固体吸附材料直接吸附含油污水中的油滴而达到分离的目的。

图 7.3-31 所示是一种油水分离器内部结构示意图,它以重力分离作为粗分离,聚合和过滤吸附作为细分离。

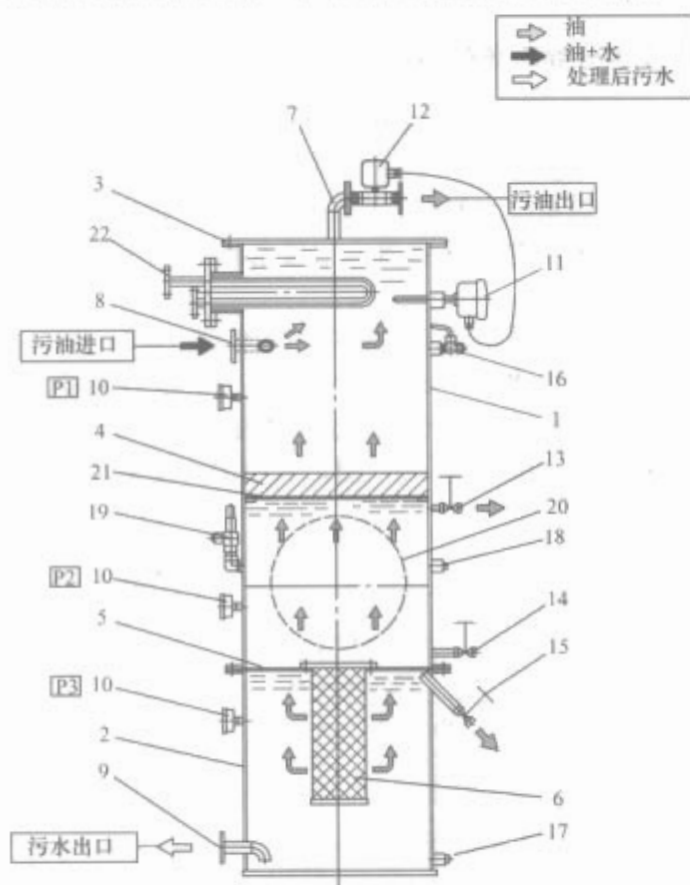


图 7.3-31 油水分离器内部结构示意图

- 1—上部筒体; 2—下部筒体; 3—顶盖; 4—聚合装置;
5—分隔板; 6—分离膜柱; 7—污油排放管; 8—进水管;
9—出水管; 10—压力表; 11—电极; 12—电动阀; 13、
14、15—阀; 16—测试阀; 17、18—泄放口; 19—安全
阀; 20—检修口; 21—多孔板; 22—蒸汽加热器

待分离的污水由污水泵从污水柜中送至油水分离器,污水从分离筒 1 上部的进水管 8 进入分离筒。粗大油滴依靠比重差上浮,进入分离筒上部的集油腔而与水分离,含有细小油滴的污水继续自上而下、由外向里流向由金属丝网制成的

聚合装置 4。在聚合装置中,细小的油滴逐渐聚合成大油滴,获得足够的浮力后,进入分离筒上部的集油腔。在聚合装置中无法聚合成大油滴的微小油滴随污水流至分隔板 5 下侧的由聚乙烯材料制成的油水分离膜柱 6,微小油滴不断聚合成足够大的油滴,浮出油水分离膜柱最后进入集油腔。这样,污水柜中的污水经过重力、聚合装置和油水分离膜柱的处理,可基本上除去油分,从出水管 9 排出。

在油水分离器工作期间,上部集油腔内被分离出来的污水会逐渐增多,油水分离界面会随之下移,油水分离界面由单电极式检测控制器监测。当油水分离界面下移至电极棒以下时,检测控制器将自动使电动阀 12 获电打开,把集油腔内的污油排至污油柜中。污油柜中的污油或送至焚烧炉烧掉或加热浓缩。

6.2 自动排油控制

船舶油水分离器的自动排油控制系统主要有以下几种形式:

1) 双电极式。两个电极 S1 和 S2 分别置于油水分离界面控制范围的上限和下限位置上,分离筒本体接地。根据油和水导电性质不同来监测油水分离界面的高低,以控制排油电磁阀的开关动作。

2) 单电极式。单电极的检测原理与双电极基本相同,利用油和水的不同介电常数确定油水分离界面的位置。

3) 浮子针阀式。浮子针阀置于分离筒中,其容量比大于油的密度而小于水的密度。当油水分离界面下降至下限时,浮子针阀重力大于浮力与所受压力之和,针阀自动开起排油;当油水分离界面上升至上限时,浮子针阀浮力大于重力,针阀自动关闭。

整个油水分离界面检测和控制电路由电源电路(power source)、振荡电路(oscillation circuit)、检测电路(detection circuit)、放大电路(amplifier circuit)、比较电路(comparison circuit)和输出继电器(relay)组成。当电极棒位于油污中时,检测电路处于谐振状态,放大电路的输出最小,经过比较电路和输出继电器打开污油出口,将污油排至污油柜中;当检测电极位于油水中时,检测电路远离谐振状态,放大电路的输出较大,经过比较电路和输出继电器关闭污油出口,避免将污水排至污油柜中。

6.3 油分浓度检测装置

在油水分离器的自动控制系统中,油分浓度检测装置是最重要的设备。它随时检测分离后污水中含有浓度是否超过国际海事组织规定的 $15 \times 10^{-4} \%$ 标准,一旦超过,它会立即发出声光报警并停止向舷外排放污水。常见的油分浓度方法有如下几种:

1) 光学浊度法。利用光束通过油污水乳浊液后,直射光和散射光的强度随含油液浓度变化的原理来测定油分浓度。当一定亮度的稳定光束通过油水混合液时,因微小油滴的存在,光线发生散射,而散射光的强度则与油滴密度或浊度成正比。所以,在一定范围内散射光与透射光的强度之比大,说明水中含油分量高。

2) 荧光法。荧光法是利用紫外光照射含油污水,使石油中具有环状共轭体分子吸收紫外光而激发出荧光,再根据荧光强度与含油量有关的原理测定油分浓度。

油分浓度检测装置依据水中油分影响混浊程度(透光程度)的基本原理来检测水中油分,它是由检测体(detection cell)、光源(light throwing)、感光元件(light receiving)、

超声波振荡器 (ultrasonic wave vibrator)、压力调节器 (pressure regulator)、压力开关 (pressure switch) 和电磁阀 (solenoid valve) 组成。当被检测污水的压力大于 0.02MPa 时, 污水经滤器 (filter) 和电磁阀进入检测体, 在检测体内由超声波振荡器将其乳化。在恒定光源的照射下, 感光元件的输出与被乳化的污水的混浊程度 (透光程度) 有关, 因此感光元件的输出直接反映了污水中的含油浓度。当浓度超过规定的上限值 $1515 \times 10^{-4} \%$ 时, 油分浓度检测报警器发出声光报警。为了在超声波振荡器工作期间, 尽可能地减少检测体中污水产生的气泡, 对检测精度影响, 该装置配备了恒压阀, 以确保在检测期间污水的压力保持恒定。

为了克服被测污水中洗涤剂和悬浮物对混浊度检测精度的影响, 采用两次测量的方法, 如图 7.3-32 所示。第一次测量的时间是 T_2 , 在这段时间内超声波振荡器发出的超声波 (ultrasonic wave output) 仅能使被检污水中的洗涤剂 (detergent) 和悬浮物 (suspended solid matter) 乳化 (turbidity)。当达到稳定的混浊度时, 感光元件输出一个反映污水中洗涤剂和悬浮物浓度的电信号, 经放大单元 2 后, 该信号被存储在电路的记忆单元 3 中。第二次测量的时间是 T_4 , 在这段时间内超声波振荡器发出的超声波使被检污水中的油分乳化。当达到稳定的混浊度时, 感光元件输出一个反映污水中洗涤剂、悬浮物和油分浓度的电信号, 该信号被送至电路的放大单元 2。比较单元 4 将放大单元中的信号和先前存储在记忆单元中的信号相比较, 求出两者的差值, 此差值即反映了水中油分浓度。

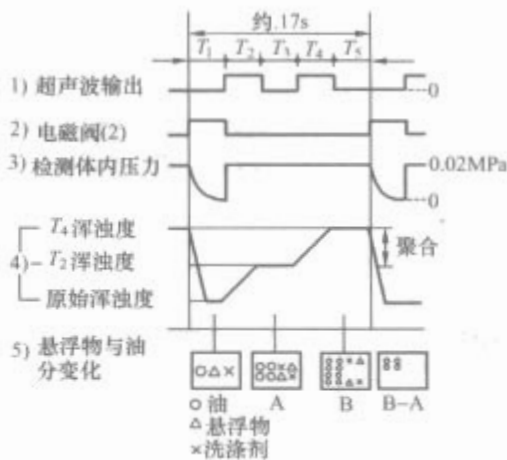


图 7.3-32 检测周期

6.4 主要技术指标

- (1) 油水分离器 (以 SASAKURA SMT—5A 为例):
分离能力: $5\text{m}^3/\text{h}$ 。
工作压力: 最大 0.29MPa。
- (2) 油分浓度检测装置 (以 FOCAS—1500c 为例):
测量周期: 17s。
测量范围: $0 \sim 30 \times 10^{-4} \%$ 。
测量误差: 小于 $\pm 515 \times 10^{-4} \%$ 。
测量压力: 0.02~0.3MPa。
被测水温: $2 \sim 45^\circ\text{C}$ 。
环境温度: $0 \sim 55^\circ\text{C}$ 。
允许震动: $2 \sim 13.2\text{Hz}$; 幅度 $\pm 1.0\text{mm}$ 。
允许倾斜: 22.5° 。



第4章 船舶导航与通信

1 陀螺导航

1.1 概述

在国防和国民经济建设中,导航对舰船、飞机和火箭等运载体有十分重要的作用。作为导航领域的一个重要分支,以陀螺仪为核心器件组成的各种惯性导航仪器有着广泛的应用。其中以牛顿力学、光电子学等为基础的惯性技术理论是这一分支的基本理论,是唯一的全自主、实时、连续、不受干扰,无时间、无地域、无环境限制的运动信息感知技术。当今,惯性技术已经成为衡量一个国家科技水平和军事实力的重要指标之一。

1852年,法国物理学家傅科(L. Foucault)首次把高速回转体说成是陀螺仪,惯性技术开始发展。当时,傅科预言利用陀螺仪可以指示地球子午线,但由于技术难度太大,未能实现。直到1906年德国的安休茨(Anschutz)和1911年美国的斯佩里(Sperry)才分别研制成功舰船用陀螺罗经。陀螺仪一词有了更广泛的意义:凡是利用高速旋转体的陀螺特性制成的仪器都称为陀螺仪。所谓陀螺特性就是指高速旋转体的定轴性,进动性和陀螺力矩。第二次世界大战以后,由于高精度制导武器的发展,需要精密的航姿参考系统和自主的惯性导航系统,古典的滚珠轴承框架式陀螺已不能满足需要,推动了新型陀螺的发展,从20世纪50年代到80年代,先后出现了液浮陀螺、气浮陀螺、动力调谐陀螺、静电陀螺、微机械陀螺、激光陀螺、光纤陀螺等。

1.2 基本原理

目前多数载体是在地球表面运行的,在这些载体中,对导航系统的要求是确定其质心在地球表面的位置信息和姿态信息。为了确定这些导航信息,首先应该建立合适的坐标系,在导航计算中,主要用到以下几种坐标系:

(1) 惯性坐标系(OXYZ)。陀螺仪器主要是解决航行体相对于地球的定位和导航问题,因此可选地心惯性坐标系。原点位于地球质心,Z轴指向地球自转轴,X和Y轴处于地球的赤道平面之中,不随地球自转。

(2) 地球坐标系(oxyz)。原点o位于地球质心,z轴指向地球自转轴,x和y轴与地球固连,随地球自转。

(3) 地理坐标系(OX_nY_nZ_n)。常用的地理坐标系和舰船固连。称为“东—北—天”坐标系,原点为载体的质心O。X_n轴和Y_n轴分别指向东方和北方,按右手法则确定坐标系,Z_n轴指向当地垂线g的相反方向。有些文献中,导航坐标系也采用“北—东—地”坐标系。

(4) 陀螺坐标系(OX_gY_gZ_g)。用来表示陀螺转子主轴在空间方位的坐标系,与陀螺仪内环固连,陀螺仪支架中心为坐标原点,X_g轴与转子轴重合,不参与自传,Y_g轴与内环轴重合,Z_g轴与X_g、Y_g轴组成右手直角坐标系。

通过坐标变换矩阵,可以把载体在一个坐标系下的导航信息转换到另一个坐标系中表示。应当指出,由于地球自转及舰船运动,舰船地理坐标系X_nY_nZ_n相对惯性空间转动,

该旋转角速度在地理坐标系三根坐标轴X_n、Y_n、Z_n上的投影为

$$\begin{cases} \omega_{nx} = -\frac{V_N}{R} \\ \omega_{ny} = \frac{V_E}{R} + \Omega_e \cos\varphi \\ \omega_{nz} = \frac{V_E}{R} \tan\varphi + \Omega_e \sin\varphi \end{cases} \quad (7.4-1)$$

式中:Ω_e为地球自转角速度;φ为纬度角;R为地球半径;V_N为舰船北向速度;V_E为舰船东向速度。

在式(7.4-1)中, $-\frac{V_N}{R}$ 、 $\frac{V_E}{R}$ 、 $\frac{V_E}{R} \tan\varphi$ 是舰船运动引起的部分;Ω_ecosφ、Ω_esinφ为地球自转引起的部分,如图7.4-1所示。

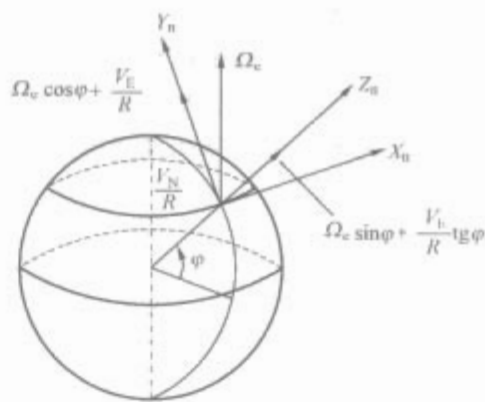


图 7.4-1 地理坐标系的旋转角速度

建立恰当的坐标系,由欧拉动力学方程,可以推导出陀螺运动的技术方程

$$\begin{cases} J\ddot{\theta} + H\dot{\alpha} = M_y \\ J\ddot{\alpha} - H\dot{\theta} = M_z \end{cases} \quad (7.4-2)$$

技术方程中含有的惯性项,即含J项,只引起陀螺主轴高频微幅的振荡运动,称为章动,章动会因为周围介质的阻力和支撑系统的摩擦而很快消失。对于高速自转的陀螺,在章动运动中主要是陀螺力矩和惯性力矩相平衡;在进动运动中,陀螺力矩和外力矩平衡则是决定性因素。因此,在研究陀螺仪的运动时,略去含有转动惯量的各项,不会影响陀螺仪主轴的主要运动特性,技术方程可简化为

$$\begin{cases} H\dot{\alpha} = M_y \\ -H\dot{\theta} = M_z \end{cases} \quad (7.4-3)$$

上式称为陀螺仪运动的进动方程,也是陀螺导航的基本理论方程,陀螺仪的基本特性(定轴性,进动性等)都可以从中得到合理的解释,陀螺罗经指北找北的特性也是建立在此基础上的。摆式罗经的工作原理如下。

(1) 如果陀螺主轴偏离当地子午线的方向,陀螺主轴本身保持稳定,但由于地球自转水平分量的存在,在表观运动上,陀螺主轴偏离水平面。

(2) 一旦陀螺主轴偏离水平面,可以采用摆产生的力矩对陀螺施加控制,使陀螺主轴进动,回到当地子午线的方向。这时陀螺主轴将围绕当地子午线方向振荡。

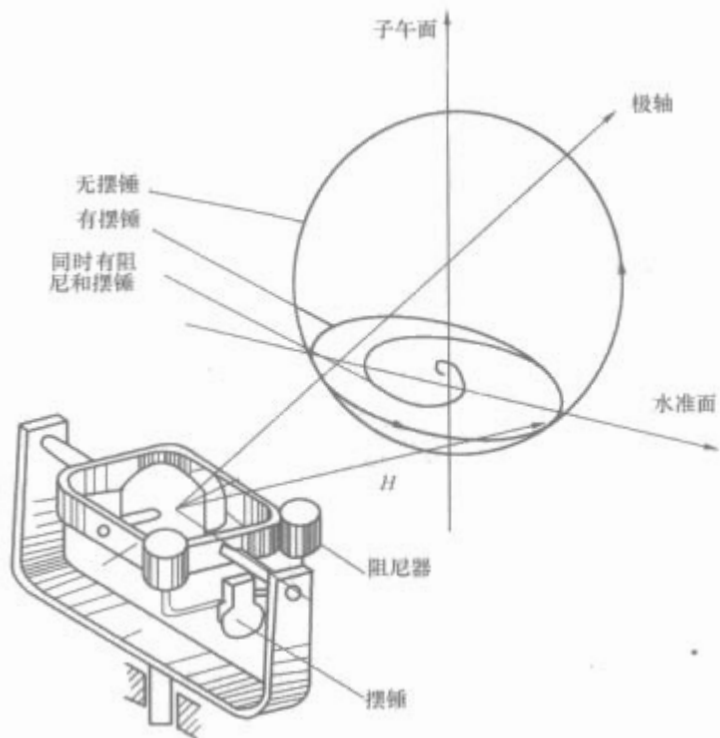


图 7.4-2 摆式罗经原理图

(3) 在上述振荡得到阻尼之后，陀螺主轴将稳定在子午线的方向上。

这种陀螺罗经的典型产品有德国的安休茨陀螺和美国的斯佩里陀螺，他们的工作原理相同，但在摆和阻尼器的结构方面各有特色。

在地球表面上，处于静止方向的摆能指示当地地垂线方向，但在运动载体上，加速度将使摆锤偏离垂线方向。1923 年，德国物理学家舒拉（M. Schuler）分析了这一现象，发现如果一个指示垂线的装置，如果其固有振荡周期等于 84.4min，则当载体在地球表面以任何方式运动时，将不受载体加速度的干扰，这一原理称为舒拉原理。根据舒拉原理调节指示垂线装置的参数，使之不受载体加速度的影响，称为舒拉调谐。

对于靠近地球表面的运载体。我们关心的导航信息是相对地球表面的即使位置和即使速度。这些导航信息可以由平台式惯导或捷联式惯导给出，惯导系统也是陀螺导航最重要的应用，下面简述其原理。

平台式惯导的原理图如图 7.4-3 所示，这种惯导系统主要由陀螺稳定平台，导航计算机和控制显示部分组成。

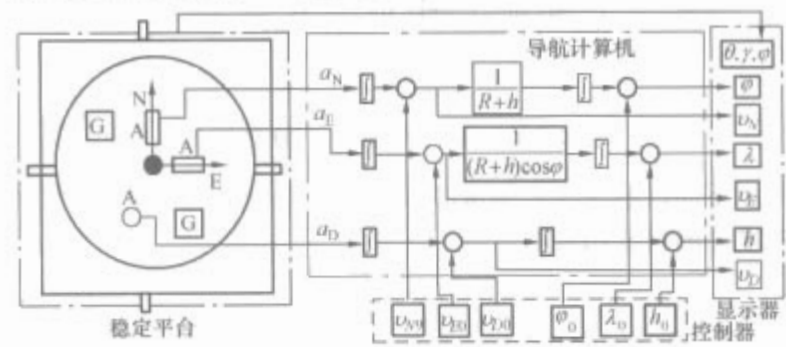


图 7.4-3 平台式惯导原理图

稳定平台是其主体部分。作用是在载体上重现导航坐标系，为加速度计提供精确的安装基准。根据所选取导航坐标系的不同，可分为空间稳定平台式惯导系统和当地水平平台式惯导系统。前者建立的是惯性坐标系，用于弹道飞弹和航天仪器，后者建立的是当地水平坐标系，一般用于飞机和巡航飞弹，还用与舰船和地面战车。对于以地理坐标系为导航坐标系的平台式样惯导，稳定平台是以陀螺仪为敏感元件的三轴稳定装置，借助伺服回路使平台绕三跟轴保持空间方位

稳定；借助修正回路，使平台跟踪当地地理坐标系。

在系统结构上，平台式惯导可分为以下三类：几何式、解析式、半解析式。在几何式系统中，对陀螺仪不施加任何控制力矩，平台被陀螺仪稳定在惯性空间中；解析式系统中，对陀螺仪同样不施加控制力矩，为了获得载体的姿态角信号和导航信号，在导航计算机中，需要对加速度计的输出信号进行坐标变换和对时间进行积分；半解析式惯导的特点是对陀螺仪施加控制力矩，使惯性平台跟踪当地地理坐标系，所以可以直接测量载体的姿态角度。

惯导系统中另一种方案是捷联式惯导，特点是陀螺仪和加速度计直接和运载体固连，没有实体的稳定平台，在导航计算机中实现平台功能。由于惯性元件要感受运载体的姿态，因此要求其测量范围较大。捷联式惯导的原理如图 7.4-4 所示。

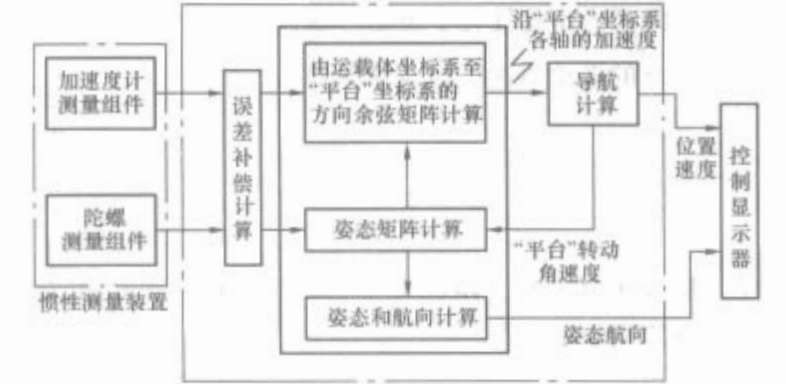


图 7.4-4 捷联式惯导原理框图

固连与运载体的陀螺测量组件和加速度计测量组件分别测出绕运载体三轴的角速度和沿三轴的加速度。陀螺测量组件的输出信号送入导航计算机，经误差补偿计算后，进行姿态矩阵计算。加速度计测量组件的输出信号送入导航计算机，同样经过补偿计算后，进行由运载体坐标系至“平台”坐标系的坐标变换计算。

捷联式惯导的优点是减少了系统的体积、重量、功耗和成本，提高了系统的可靠性，使维修和更换更加方便。但是由于捷联式系统中惯性敏感元件的误差，算法误差对系统精度的影响比平台式系统大，因此目前捷联式系统能达到的最高精度不及平台式系统。总的来说，对于中低精度的应用场合，如一般飞机和战术导弹，捷联式系统将逐步取代平台式系统；对于高精度的应用场合，如战略轰炸机和核潜艇等，在今后相当长的一段时间仍将继续采用平台式系统。

1.3 系统构成

组成一般陀螺导航系统的最基本的惯性元件是陀螺仪和加速度计，分述如下。

1.3.1 陀螺仪

把陀螺安装在专门的悬挂系统上，就构成了最简单的陀螺仪，一般的悬挂装置由内环，外环和基座组成，也称万向支架。陀螺仪具有两个最主要的特性——定轴性和进动性。应用陀螺仪的这两个特性制成的一系列仪表，能为载体提供方位，姿态和角速度，角位移等信息。随着科学技术的发展，相继发现了多种可以被用来敏感相对于惯性空间角运动的物理效应，陀螺仪这一名称扩展到没有刚体转子而功能与经典陀螺仪等同的敏感器。

陀螺仪种类繁多，主要有以下几种分类方法：

按陀螺转子主轴的进动自由度。分为二自由度陀螺仪和单自由度陀螺仪。前者可确定陀螺主轴在空间位置的两个参数：水平角和方位角。后者是把内外环中任意一环固定起

来,则转子主轴就只有剩下一个转动自由度。

按悬挂系统的工作方式。分为框架陀螺仪,液浮陀螺仪,气浮陀螺仪,静电陀螺仪和扰性陀螺仪等。

按产生陀螺效应的原理。分为转子陀螺仪,振动陀螺仪,粒子陀螺仪,激光陀螺仪和光线陀螺仪等。

下面介绍几种在惯导系统中常用的陀螺仪。

(1) 液浮积分陀螺仪。它为单自由度陀螺仪,外框架固定,在内框架上装有阻尼器,一个敏感敏感内框架转角并转换为电信号的角度传感器和一个力矩器。图 7.4-5 为其液浮积分陀螺仪结构示意图。陀螺电动机装在框架上,框架外套有浮筒、角度传感器和力矩器构成浮子组件。框架轴是陀螺转子的进动轴,为输出轴,其上装有角度传感器和力矩器。缺少的外框架为输入轴,当基座绕输入轴以角速度 ω 转动时,根据单自由度陀螺的特点,基座强迫转子随之转动,同时产生的陀螺力矩将使转子绕输出轴进动,由于阻尼力矩的存在,最终的进动角速度 $\dot{\beta}$ 会达到稳态

$$\dot{\beta} = K\omega \quad (7.4-4)$$

从而

$$\beta = K \int \omega dt \quad (7.4-5)$$

式中: K 为比例常数。由此可见,积分陀螺仪可以作为测量输入轴角速度的元件。

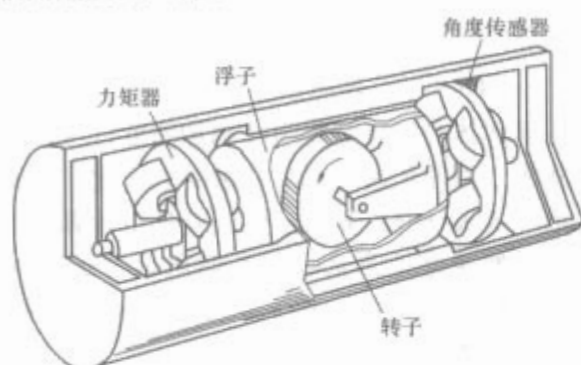


图 7.4-5 液浮积分陀螺仪结构示意图

(2) 二自由度液浮陀螺仪。与框架式原理相同,只是为了消除摩擦,把陀螺组件做成球形状,并悬浮于液体中,球形陀螺组件成为陀螺球,内装陀螺电动机,高比重的浮液产生的浮力使陀螺球悬浮。因为陀螺球有两个转动自由度,保证绕基座转动时其指向保持稳定。二自由度陀螺仪是双输入双输出元件,当不对陀螺球施加控制力矩时,输入输出均是其围绕两根正交轴的转角,也就是基座的转角,故又称位置陀螺。由于结构限制,二自由度液浮陀螺仪测量角的范围比较小,使用时要保证起工作在零位附近。当对陀螺施加控制力矩时,陀螺仪的输出显然是由控制力矩产生的陀螺进动角度与基座本身转动角度之差。

(3) 扰性陀螺仪。扰性陀螺仪是一种非液浮具有弹性支承的二自由度陀螺仪。有细颈式扰性陀螺仪和动力调谐扰性陀螺仪。前者主要由陀螺转子、扰性接头、驱动轴、磁滞电动机、信号传感器和力矩器等组成,陀螺转子的转动是靠磁滞电动机通过驱动轴和扰性接头带动的。为了得到扰性陀螺转子轴与驱动轴线间的位置关系,在陀螺径向圆周内相差 90° 安有两个角度信号传感器,为了给陀螺施加指令力矩,使陀螺按规律跟踪地球转动,在径向圆周内同时安有两个互相垂直的力矩器。

扰性支撑简化了陀螺的结构,消除了摩擦力矩对陀螺的影响,但是弹性力矩的引入对陀螺来说也是一种干扰力矩,但弹性力矩是有规律可循的,因此可以利用各种方法

进行补偿,例如细颈式扰性陀螺仪可以通过在转子上加装导磁环进行磁力补偿。目前对弹性力矩补偿的较好而又比较适用的是动力调谐扰性陀螺仪。图 7.4-6 为其原理图。这种陀螺中驱动轴与转子是用平衡环及互相垂直的内外扭杆连接。两根扭杆可以扭转但不易弯曲。所谓动力调谐就是依靠平衡环自身在参与旋转中的惯性力矩来补偿扭杆产生的弹性力矩的。

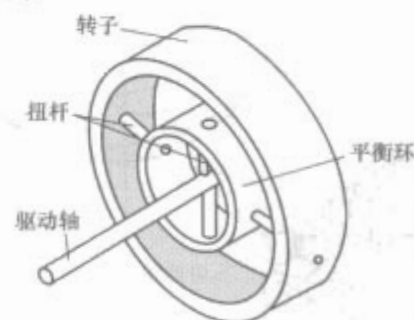


图 7.4-6 动力调谐扰性陀螺仪原理图

1.3.2 加速度计

惯性导航系统中利用加速度计获取载体的加速度信息,从而推算出载体的速度和位置。加速度计的测量精度,对舰船导航系统的水平精度和定位精度有着直接的影响。目前在惯性导航系统中,应用最广泛的是具有宝石支承结构的液浮摆式积分加速度计、挠性支承的摆式加速度计和陀螺摆式加速度计三大类。宝石支承结构液浮摆式加速度计:结构复杂、加工装配难度较大,但其精度及长期稳定性均相当好。因此已广泛应用于舰船导航系统中。挠性支承摆式加速度计:尺寸小、重量轻、结构简单、成本低,但长期稳定性不够理想,由于没有温控,受环境温度影响较大,它主要用于中、短程导弹及民用技术中。现在广泛使用的石英挠性加速度计也可用于捷联式导航系统中。陀螺摆式加速度计,尺寸大,重量重,结构复杂,但精度高,稳定性好,尤其在大量程范围内,能保持高精度,它主要用于大型运载火箭中及一些特殊的用途中。

图 7.4-7 为一北向加速度计 A_N 的功能框图,用来测量一北向加速度 a_N ,加速度计的输出一经过一次积分可得到载体的速度,再积分一次便可获得载体行驶的距离。除以地球半径,再加上初始位置的纬度值中 Φ_0 ,便可得到航行体的当时当地纬度 Φ 。

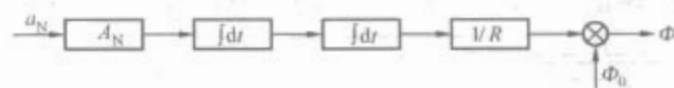


图 7.4-7 北向加速度计功能框图

下面以液浮摆式加速度计(如图 7.4-8 所示)为例介绍加速度计的组成和基本原理。

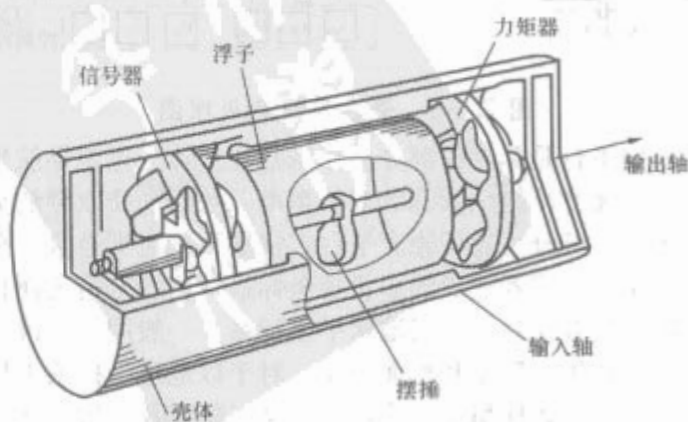


图 7.4-8 液浮摆式加速度计结构图

液浮摆式积分加速度计系统由表体、脉冲施矩反馈回路和温度控制器三大部分组成。

表体是敏感元件，它敏感舰船相对于惯性空间的运动加速度，并把它转换成电压信号输出。表体由浮子摆组件、角度传感器、力矩器，充满粘性液体的密封壳体，温度敏感元件和测量元件，加热绕组以及补偿浮液体积变化的波纹管等组成。浮子摆组件是用来敏感舰船加速度，且把加速度转变为转角的敏感元件。浮子摆的一端装有角度传感器的转子，其定子安装在壳体上，角度传感器是把浮子摆的转角转变为电压信号。浮子摆的另一端装有力矩器的转子，定子装在壳体的端盖上，力矩器是把脉冲反馈电流转换成脉冲力矩，以此恢复力矩以平衡加速度所产生的摆力矩。温度控制器用来控制整个仪表的温度，以保证浮子摆处于悬浮状态，且使浮液的黏度稳定，从而使加速度计的动力学特性保持不变。波纹管则是用来补偿液体因温度变化而引起的体积变化。

脉冲施矩反馈回路把表体输出的电压信号经过放大，转换处理成脉冲形式输出，并与表体一起组成力矩再平衡系统。温度控制器能在环境温度变化时，保持表体内的温度始终维持在正常的工作温度范围内，从而使浮液的黏度，比重及各电磁元件的温度系数和结构尺寸保持恒定。这对保证仪表的高精度和高稳定性极为重要。

惯性稳定平台是惯性导航中的一个重要系统，起到对舰船进行导航和测量姿态的作用。惯性稳定平台有许多种，这里不一一赘述。实际中最常见的是三轴陀螺稳定平台，能够使被稳定对象在惯性空间中绕三根互不平行的轴保持稳定，在平台罗经和惯导中都得到了广泛的应用。图 7.4-9 是一种由三个单自由度积分陀螺仪构成的三轴稳定平台。它的基本原理如下：

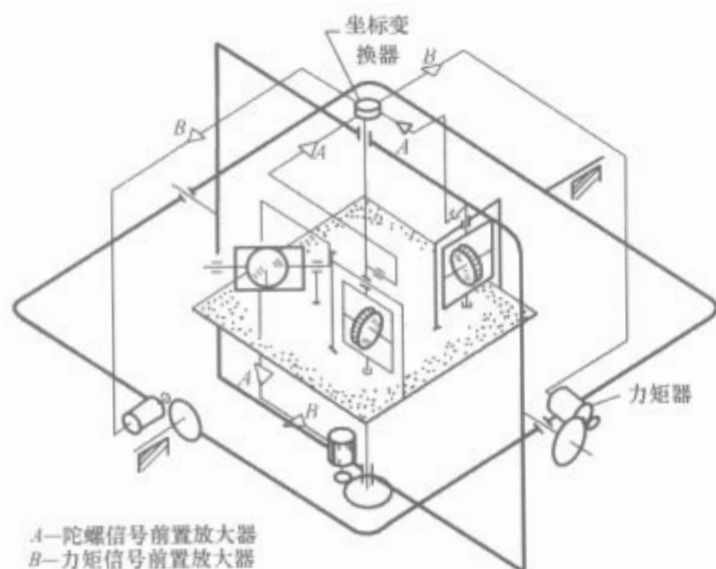


图 7.4-9 单自由度积分陀螺仪构成的三轴稳定平台

当平台受到绕方位轴的干扰力矩作用，相对惯性空间转动而偏离给定方位时，方位陀螺会敏感该角度，输出轴产生输出信号，经放大后控制力矩电动机产生稳定力矩克服干扰力矩，从而使平台绕方位轴保持稳定，由此构成了稳定平台的基本稳定回路：稳定平台→陀螺仪→放大器→力矩电动机→稳定平台，如图 7.4-10 所示。



图 7.4-10 基本稳定回路

平台水平稳定回路中的工作原理与此相仿。但当载体改变航向时，平台的横摇轴、纵摇轴及相应的力矩电机跟随台体转动，而台体又要保持原来的方位稳定，就使两个陀螺的输入轴和所控制的力矩电机轴向并不重合，通道之间互相耦合，为了达到正确的控制效果，引入了坐标变换器对陀螺的输出信号进行信号分配，用分配后的信号再控制相应的力矩电机，实现了平台的水平稳定。

通过计算，由导航计算机向陀螺仪力矩器输入大小恰当的指令电流，就可以使稳定平台绕稳定轴转动，通过所谓的修正，模拟一个相对惯性空间有转动的坐标系，如当地地理坐标系。修正作用由修正回路实现。水平修正回路的敏感元件为加速度计或摆元件，当利用加速度计作为敏感元件时，加速度计的输出信号中，除了包含载体水平运动加速度外，还包含有平台偏离水平面时出现的重力加速度分量。对于平台的水平修正来说，前者是干扰信号，后者为有用信号。加速度计的输出信号经导航计算机计算后分离出有用信号，以指令电流的形式加给水平陀螺输出轴上的力矩器，力矩器产生修正力矩使陀螺仪绕输出轴转动，转角由陀螺仪输出轴上的传感器敏感，再通过水平稳定回路的作用，使平台绕水平轴始终跟踪当地水平面。为了消除载体水平运动加速度对水平修正回路的影响，水平修正回路应当进行舒拉调谐。平台方位修正回路的控制信号也来自导航计算机，原理和水平稳定回路相仿：计算机计算出子午面相对惯性空间的转动角速度，转换为指令电流加给方位陀螺输出轴上的力矩器，力矩器产生修正力矩使陀螺仪绕输出轴转动，转角由陀螺仪输出轴上的传感器敏感，再通过方位稳定回路的作用，使平台绕方位轴始终跟踪当地子午面。

1.4 典型产品介绍及注意事项

陀螺导航作为一门综合性实用性的技术，在国防和国民经济中占有重要的地位。平台罗经、惯导等成熟的产品在导航、制导和控制领域也都得到了广泛的应用。下面以美国 Sperry 公司生产的 MK 39 MOD 3A Ring Laser 型船用激光陀螺惯性导航系统为例，简要介绍其系统特点、技术性能指标和使用条件等。

美国 Sperry 公司是世界上第一个申请航海领域罗经专利的公司，在军用陀螺导航领域长期处于领先地位。1990 年，该公司把 RLG 技术引入舰船和潜艇，加快了其取代传统机械陀螺的进程。目前，Sperry 公司的 MK49RLG 型激光陀螺惯性导航系统已经成为北约舰船和潜艇的标准导航系统，而 MK39RLG 也大量装备其他各国海军以及美国军用补给船、海岸警卫队等等，现在世界上 80% 的激光陀螺导航系统都是该公司所生产。



图 7.4-11 主体仪器



MK39 RLG 系统是 Sperry 公司的第三代激光陀螺惯性导航系统,能够给舰船提供高精度的位置信息、姿态信息和航向信息用来进行火控系统的稳定控制和武器的初始校准。由于其良好的低噪声性能,该系统更适用于潜艇。

图 7.4-11 和图 7.4-12 分别为图 7.4-12 激光陀螺 MK39 RLG 系统的主体仪器和核心部件——激光陀螺。

2 卫星导航

2.1 概述

卫星导航 (satellite navigation) 是指利用导航卫星系统为地面、海洋、空中和空间用户提供导航定位。卫星导航是在传统的天文导航和无线电导航的基础上发展起来的现代化导航技术,它克服了天文导航对气象条件的依赖和无线电导航在中远距离误差较大的缺点,具有全球覆盖、全天候、全天候、高精度导航定位的特点。卫星导航的基本作用是向各类用户和运动平台实时提供准确、连续的位置、速度和时间信息。卫星导航定位技术目前已基本取代了无线电导航、天文导航、传统大地测量技术,并推动了全新的导航定位技术的发展,成为人类活动中普遍采用的导航定位技术,而且在精度、实时性、全天候等方面对这一领域产生了革命性的影响。

美国是世界上最早发展卫星导航技术的国家,也是卫星导航技术最发达的国家。1958 年底,美国海军武器实验室就着手建立为美国军用舰艇导航服务的卫星系统,即“海军导航卫星系统”(Navy Navigation Satellite System, NNSS)。该系统中卫星的轨道都通过地极,故也称“子午 (transit) 卫星系统”。1964 年该系统建成,并开始在美国军方启用,1967 年美国批准该系统解密,并提供民用。子午仪卫星导航系统是美国的第一代导航卫星系统,经常有 4~5 颗工作星,具有全天候、全球导航和利用单颗卫星定位的优点,能进行二维定位,定位精度为几十米至几百米。子午仪卫星导航系统实现了全球导航定位,但是,它不能连续定位、实时定位和三维定位,目前已停止使用。为克服子午仪卫星导航定位系统的这些局限,美国国防部于 1973 年正式批准陆海空三军共同研制国防卫星导航系统——“授时与测距导航系统/全球定位系统”(navigation system timing and ranging/global positioning system),通常简称为“全球定位系统”。1994 年 3 月全面建成了由 24 颗卫星 (其中 21 颗工作星,3 颗备用星) 组成的星座系统,可为用户提供全天候、连续、实时、高精度的三维位置、三维速度和精确时间。

前苏联也十分重视卫星导航技术的发展,其导航卫星也发展了两代。类似于“子午仪”的第一代“奇达卡”导航卫星系统混编在“宇宙”号卫星系列中。类似于 GPS 的第二代“全球导航卫星系统”(GLONASS) 由 24 颗卫星组成,可提供全天候、全天候、高精度的三维导航定位和授时服务,定位精度约 100m,测速精度 0.15m/s,授时精度 1μs。

2002 年 3 月 26 日欧盟 15 国交通部长会议一致决定正式启动伽利略 (galileo) 卫星导航定位系统计划。伽利略计划是欧洲旨在建设独立于美国 GPS 的一项全球卫星导航定位系统计划。伽利略卫星定位系统计划将由 30 颗轨道卫星组成,卫星的轨道高度为 24 000km,倾角为 56°,分布在 3

个轨道面上,每个轨道面部署 9 颗工作星和 1 颗在轨备份星。伽利略卫星定位系统将为用户提供误差不超过 1m、时间精确的定位服务。此外,日本和印度也提出了各自的卫星导航计划。

2000 年我国自主建立了全天候、全天时提供卫星导航信息的区域导航系统——北斗卫星导航系统,它由两颗工作卫星和一颗备份卫星组成。前两颗是工作卫星,分别于 2000 年 10 月 31 日和 12 月 21 日发射升空。第三颗是备份卫星,于 2003 年 5 月 25 日发射升空。它可以在任何时间、任何地点,为用户确定其所在的地理经纬度和海拔高度,并提供双向短报文通信和精密授时服务。

卫星导航技术对国防建设和国民经济发展均有重要影响。在军事上,应用卫星导航技术的卫星导航定位系统具有广泛的军事应用。卫星导航定位系统可为地面车辆、人员以及军舰、潜艇、飞机以及近地军用卫星等进行导航和定位;可为精确制导武器的投掷与发射提供精确制导、定位、计时和测速数据,最大限度地减少攻击目标所需的力量,同时把风险、伤亡和附加破坏降低到最低限度;可提供全球三维坐标参照系统,统一作战部队所在地、行动方向和目的地的定位标准,便于灵活机动地调动部队和准确有效地使用武力,对多军种联合作战具有重要意义;可为搜索救援、布雷扫雷等提供精确的位置信息等。

在国民经济发展中,卫星导航技术的应用也日益广泛。农作物耕种、大地测量、铁路与公路运输、航海、特别是航空交通管制,都需要建立卫星导航定位系统。其中,航空交通管制采用卫星导航,将大大提高目前民航的效率和安全性,具有重大的经济效益。

2.2 基本原理

卫星导航定位就是在测站上以卫星为观测目标,获取测站至卫星的观测矢量 ρ , 利用观测矢量和已知的卫星位置矢量 r 计算测站点坐标。

如图 7.4-13 所示,在测站观测卫星,若得到观测矢量 ρ , 已知卫星位置矢量为 r , 则测站的位置矢量 x 为

$$x = r - \rho \quad (7.4-6)$$

相反,若已知测站矢量 x , 由观测矢量 ρ 可求出卫星位置矢量 r , 即

$$r = x + \rho \quad (7.4-7)$$

式 (7.4-6) 是利用卫星进行测站点定位的基本方程式,式 (7.4-7) 是由已知点测定卫星位置的基本方程式

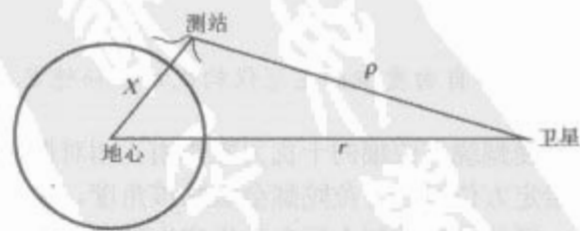


图 7.4-13 卫星定轨或定位示意图

虽然式 (7.4-6) 是利用卫星进行测站点定位的基本方程式,但前提是不但观测矢量的距离要确定,而且方向也要确定,而现代导航卫星多采用测距离差或测距离体制进行定位。因此,导航卫星的定位原理与上稍有不同。基础方程仍是式 (7.4-6),不同的是联立多个距离差或距离方程来确定用户坐标定位,下面主要介绍双曲线和三球交会定位基本

原理。

2.2.1 双曲线交会定位

双曲线是到两定点（焦点）的距离之差为常数的动点的轨迹。若 u 点为测站， S_1 和 S_2 为两颗卫星，在 u 点观测到两卫星 S_1 和 S_2 的距离差，

由这个距离差可作一对双曲线（在三维空间为双曲面），其中一条双曲线（双曲面）过测站。如果在 u 点测得三个距离差，就可确定三个双曲面，这三个双曲面的公共交点就是测站点，这就是双曲线定位。如图 7.4-14 所示。

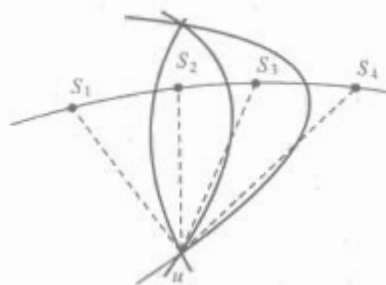


图 7.4-14 双曲线交会定位

距离差的测定有许多方法，有的采用多普勒法，如子午仪卫星导航，有的采用相位差法，如欧米伽导航系统；有的采用脉冲时间差法，如罗兰导航系统。

2.2.2 三球交会定位

所谓三球交会，就是说，以位置已知的点（卫星点或地心点）为球心，以观测边长为半径，三个这样的大球可交出测站点坐标。如图 7.4-15 所示， S_1 、 S_2 和 S_3 为三颗已知其位置的卫星， ρ_1 、 ρ_2 和 ρ_3 为测站 u 观测各卫星所得的对应边长。

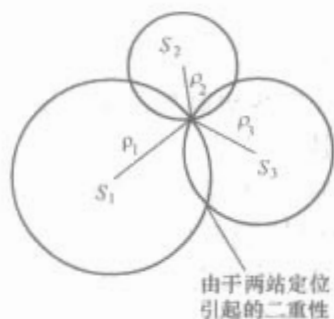


图 7.4-15 三球交会定位

对每一个大球可列出方程

$$\sqrt{(X-X_i)^2+(Y-Y_i)^2+(Z-Z_i)^2}-\rho_i=0 \quad i=1,2,3 \quad (7.4-8)$$

式中： (X, Y, Z) 为测站点待求坐标； (X_i, Y_i, Z_i) 为卫星已知坐标。三个观测值可列出三个方程。由于球心坐标为已知，三个方程只有三个未知数，故可以求解得出测站坐标。

GPS 是利用四球相交，因为解算中还要推求时钟改正数。所以，GPS 是用四个方程求解四个未知数，即四维定位。北斗系统是用两个以卫星为球心的大球，同过测站的近似地球椭球相交，实质也是三球交会，但近似椭球高程要已知，所以双星定位是二维定位。

2.3 系统构成

卫星导航系统主要由导航卫星、地面台站和用户定位设备 3 部分组成。导航卫星是卫星导航系统的空间部分。为了提供全球覆盖的导航定位能力，必须由若干颗导航卫星构成导航卫星星座。低轨道导航卫星星座一般由 4~6 颗卫星组成，中高轨道导航卫星星座需要十几颗到二十几颗卫星组成。星载导航设备由高稳定度时钟、遥控接收机、导航电文存储器、播发导航信号的双频发射机和定向天线等组成。其中时钟是卫星导航最关键的设备，对频率稳定度的要求很高。如美国“子午仪”导航卫星上的时钟用的是晶体振荡

器，频率稳定度应为 $10^{-10} \sim 10^{-12}$ ；美国 GPS 全球定位系统则采用稳定度更高的铷、铯、氢原子钟，其中氢原子钟的频率稳定度高达 10^{-14} 。

地面台站通常包括跟踪站、遥测站、计算中心、注入站等部分，用于跟踪、测量、计算及预报卫星轨道并对星上设备的工作进行控制管理。用户定位设备包括接收机、定时器、数据预处理机、计算机和显示器等。它接收卫星发来的微弱信号，从中解调并译出卫星轨道参数和定时信息，同时测出导航参数（距离、距离差和距离变化率等），再由计算机算出用户的位置坐标和速度矢量分量。

2.4 GPS 全球定位系统

GPS 系统通过用户接收机接收卫星发射的导航信号，测出由卫星发出的信号传输到接收机的传输时间 t_i ，就可计算出用户至第 i 颗卫星的距离为

$$\rho_i = C t_i \quad (7.4-9)$$

在 GPS 的用户设备中，通过测量相同的伪码是由卫星和用户分别产生的，它们都与各自的时钟同步，用户接收机的本地码在和卫星发来的伪码达到最大相关之前一直在移动。通过本地码的计时与接收机的时钟的计时比较，就能测出信号的到达时间，从而求出用户到卫星的距离。

GPS 系统与地面（或近地）无线电导航定位系统及其他卫星导航定位系统相比，具有以下特点：

(1) 全球覆盖：该系统能为全球任何地点或近地空间用户提供连续的全球导航能力。而地面（或近地）无线电导航定位系统有效作用范围有限，子午仪系统也只能进行断续定位，且平均定位间隔为 1.5h 左右。

(2) 高精度三维定位：该系统能连续地为各类用户提供三维位置、三维速度和精确的时间信息，定位精度优于 10m，测速精度优于 0.1m/s，计时精度优于 10ns（相对于全球定位系统的时间标准），而相对世界协调时（UTC）的授时精度优于 1μs；将来有可能提高到 100ns。

(3) 近乎实时导航：系统一次定位时间只要几秒钟，多至几十秒就可以完成，这对于高动态用户来说有很大意义。而子午仪系统一次定位需时约十几分钟左右，对飞机来说，这段时间飞机的飞行距离可达几十公里、甚至几百公里，因此子午仪系统对高速用户意义不大。

(4) 抗干扰能力强：系统采用“伪随机码”扩频技术，导航信息表面上是随机噪声信号，但实际上是按预先确定的数学公式编码而产生的信号，因此具有抗干扰能力强、保密性好等优点。

(5) 通用全球导航系统：这也是全球定位系统的最重要特点之一。由于子午仪系统只能作为辅助导航手段向海上用户提供断续定位，因此，用户还必须装备其他能连续提供导航信息的设备，如惯性导航设备等。而 GPS 系统能向全球任何地点和近地空间的独立用户提供连续的高精度导航信息，并给出用户在全球定位系统坐标系的位置、速度和时间。因此，该系统能克服其他各种导航手段的局限性，而成为能真正独立的通用全球定位系统，这就有可能从根本上解决各种导航设备种类繁多和费用不断增加的问题。

(6) GPS 系统卫星轨道高度为 20 183km，轨道周期为 12h，受地区重力场和大气阻力的影响较小，轨道的进动不像子午仪系统那样严重。

2.4.1 定位系统组成与功能

全球定位系统（GPS）由三部分组成：卫星星座、地面测控网和用户接收设备。卫星星座包括在轨卫星，向用户设

备提供测距信号和数据电文,完成对空间卫星的跟踪和维护,监视卫星的地面测控网运行状态和信号的完好性,并保持卫星的轨道布局。此外,还要更新卫星的时钟校正量和星历,以及其他确定用户位置、速度和时间等至关重要的参数。最后,用户设备完成导航、授时和其他有关的功能(例如测绘)。

2.4.1.1 GPS卫星星座

卫星星座由额定24颗卫星的星座构成。卫星位于6个地心轨道平面内,每个轨道4颗卫星。GPS卫星的额定轨道周期是半个恒星日,即11h58min。各轨道接近于圆形,而且沿赤道以60°间隔均匀分布,相对于赤道面的倾斜角额定55°。图7.4-16描述了GPS星座。轨道半径(即从地球质心到卫星的额定距离)大约为26600km。这一卫星星座为全球用户提供24h导航和时间确定能力。

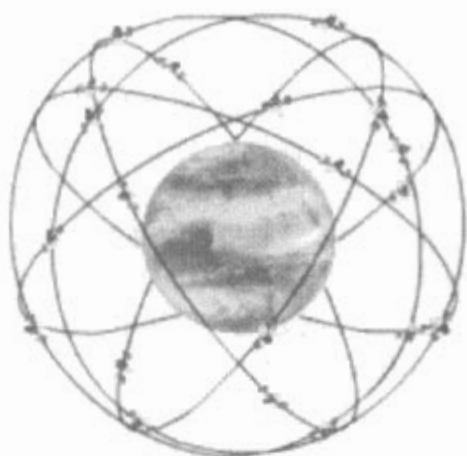


图7.4-16 GPS卫星的星座

GPS系统空间卫星采用20183km中高度圆形轨道,卫星的设计运行周期为11h57min58.3s(半个恒星日)。这样的轨道高度恰好使运行周期等于半同步周期,当地球绕自转轴一周时,每颗卫星在轨道上绕两周,卫星每天提前约4min经过同一地点,这样,使美国能在国内建立地面控制站,并可保证至少每天能对卫星进行一次监测控制。

GPS卫星外形结构(Block II/IIA, Block IIR/IIR-M)如图7.4-17所示。卫星主体呈柱形,直径1.5m,发射质量774kg,轨道质量464kg,星体两侧伸出的两块双叶为对日定向太阳能电池帆板,全长5.33m,朝向地球的发射天线由12个螺旋天线组成。螺旋天线阵辐射宽度约为30°的波束,覆盖在卫星视界内的地面上天线辐射的波束为圆极化电波。

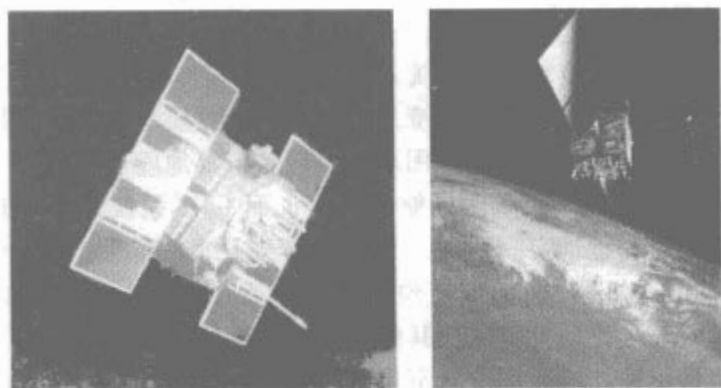


图7.4-17 GPS卫星外形结构

GPS卫星主要由下面七个部分组成:电源部分,姿态、速度控制部分,遥测、跟踪与指令部分,温控部分,结构部分,反作用控制/入轨发动机部分,导航部分。

卫星用两个频率(即 $L_1 = 1575.42\text{MHz}$, $L_2 = 1227.60\text{MHz}$)发送导航信息,采用伪随机噪声码调制, L_1

载频用P码和C/A码调制, L_2 载频用P码调制。卫星星历和卫星时钟数据都以50bit/s的数据码调制到伪随机噪声码上,两种码的主要用途是用来识别卫星和测量导航信号的传播时间。P码是一种长的精确码,码钟速度为10.23Gbit/s,7天重复一次,不易捕获,主要用来精确测量导航信号的传播时间,从而确定伪距,进行精确定位。C/A码是一种短的粗测码,主要用来快速捕获导航信号,码钟速度为1.023Gbit/s,1ms重复1次,主要供民用。

定向天线辐射信号功率电平, L_1 频段P码-163dBW, C/A码-163dBW, L_2 频段P码-166dBW。卫星通过定向天线向地球上可测范围内的用户连续地发射导航电文。

GPS系统工作于L波段, $f_1 = 1575.42\text{MHz}$, $f_2 = 1227.60\text{MHz}$,采用此频段的原因是:

(1) 目前L波段频率占用率较低,不像甚高频频段(通信频段)那么拥挤。

(2) 采用L波段,允许传送的信号有较宽的带宽。GPS系统采用了扩频技术,信号带宽增至20MHz左右,如果把这样宽带的信号安排在本来已很拥挤的甚高频段就困难了。

(3) 射频较高时,电高层附加延时减小,这对于廉价单通道接收机来说,可减小电离附加延时引入的误差。

(4) GPS卫星轨道较高,为了使多普勒频移足够大以便于测速,因此应选用较高的载频。

(5) L波段的电波比起更高频率的电波大气传播吸收衰减较小。

(6) 目前L波段有可能采用低噪声晶体管放大器作接收机前置放大。而不需像更高频段采用昂贵的参量放大器作为前置低噪声放大器。

2.4.1.2 地面控制站网的组成与功能

GPS系统的地面控制站网由三大部分组成:监控站、主控站、注入站。这三大部分包括5个监控站、1个主控站和3个注入站,这些站都设在美国国土上,包括美洲大陆的本土、太平洋的关岛和夏威夷、印度洋的选哥伽西亚以及大西洋的阿森松群岛。GPS系统地面控制站网的分布如图7.4-18。



图7.4-18 GPS系统控制站网的分布

主控站,设在科罗拉多州的统一空间操作中心(CSOC)。主控站负责地面控制站网的全面控制。主控站设有精密时钟,是GPS的时间基准,各监控站和各卫星的时钟都须与其同步。

监控站:5个监控站分别设在阿拉斯加州埃尔门多夫空军基地、加利福尼亚州的范登堡空军基地、夏威夷、关岛和夸贾林岛。每个监控站装备有大型双频用户接收机、环境数据传感器、原子频标(即用铷钟、铯钟作为时间标准)、计算机及同主控站联系的通信设备。监控站都是无人的数据收集中心,在主控站遥控下,监控站的天线能自动跟踪视界中的所有卫星,并在L波段接收来自卫星的导航信号。

注入站:3个注入站分别设在关岛、阿森松岛和选哥伽

西亚。当 GPS 卫星通过注入站视界时，注入站通过 S 波段载频将主控站送来的星历数据、环境数据、钟差（时间漂移）数据、电离层传播延迟修正数据等注入 GPS 卫星，所有这些数据均被存入卫星上的存储器中，以更新原来那些相应数据，并形成卫星向用户发送的新的导航信息。注入站还负责监测注入卫星的导航信息是否正确。注入站每天（24h 间隔）向卫星注入一次新的导航数据。

2.4.1.3 用户设备的组成与功能

GPS 的用户设备主要是 GPS 导航接收机，不同结构类型的接收机适用于不同精度要求和具有不同量级的主运载器动态特性和不同的干扰环境条件。一次定位的时间从几秒至几分不等，这取决于接收设备的结构完善程度。

尽管各种类型的接收机结构复杂程度不同，但都必须完成下列基本功能：选择卫星，捕获信号，跟踪和测量导航信号，校正传播效应，计算出导航解，显示及传输定位信息。

用户设备一级由四大部件组成，即天线、接收机、计算机及输入/输出设备。

大多数接收机有多个通道，每一个通道跟踪来自一颗卫星的发射信号。图 7.4-19 给出了一般性的多通道 SPS 接收机的框图。

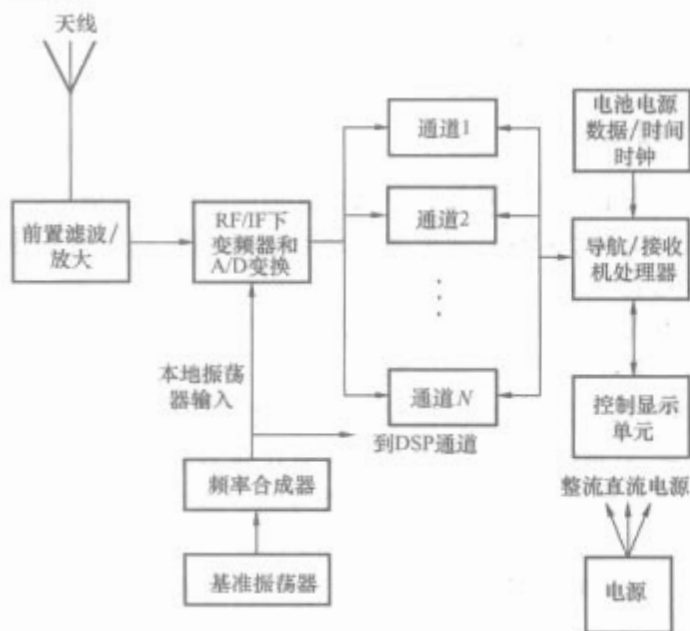


图 7.4-19 一般的多通道 GPS 接收机框图

2.4.2 伪随机码与 GPS 测距码

GPS 播发的信号，为了满足高精度定位和不能占用较大频带宽度的要求，使用了伪随机码调制和测距技术。

(1) 伪随机码。伪随机序列为具有随机序列特性的非随机序列，其既有良好自相关特性，又是周期性的，预先能确定的，因而也能复制的序列。二进制码元“0”和“1”组成的伪随机序列亦称二进制伪随机码，简称伪码（Pseudo Random Noise, PRN）。

(2) GPS 测距码。GPS 系统中使用了两种伪随机码，一种用于分址，搜捕卫星信号，粗测距且有一定抗干扰能力的明码，它兼顾民用，简称 C/A 码。另一种用于分址，精密测距，且具有更强抗干扰能力的军用密码，称 P 码。均属伪随机码，图 7.4-20 是 GPS 码发生器原理示意图。

2.4.3 GPS 卫星信号的构成

GPS 卫星信号包含有三种信号分量，即载波、测距码和数据码。如图 7.4-21 所示。

2.4.4 GPS 卫星的导航电文

导航电文是卫星向用户提供的导航信息，用户应用这些信息于导航解算。导航电文包括计算卫星位置的有关数据

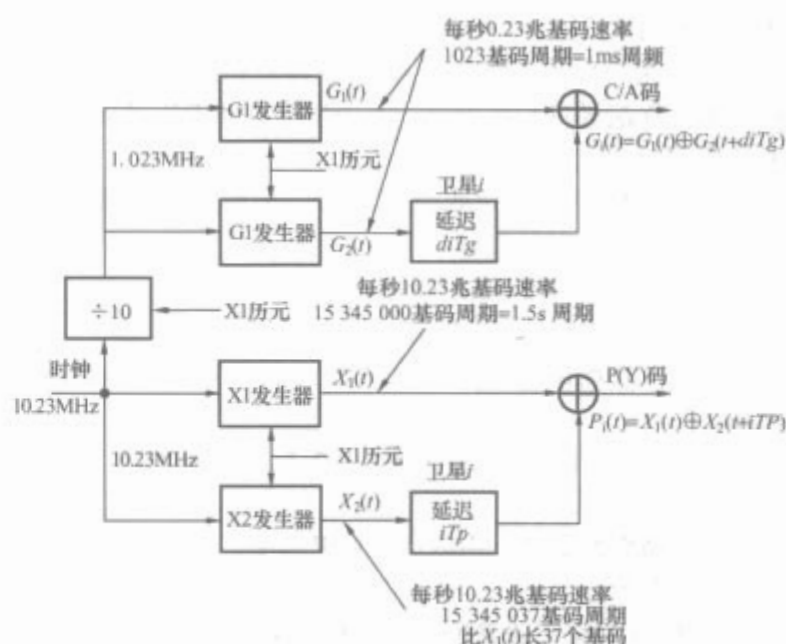


图 7.4-20 GPS 码发生器原理示意图

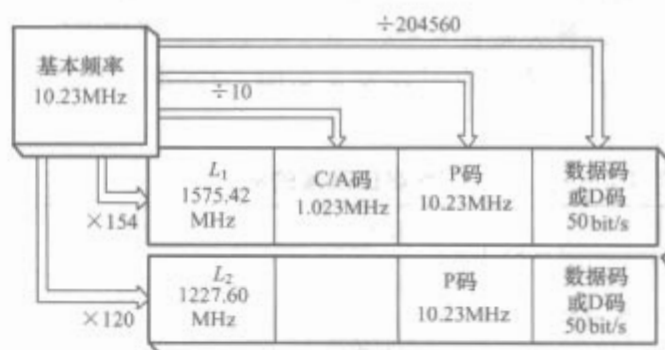


图 7.4-21 GPS 卫星信号示意图

（卫星星历）、系统时间、卫星钟参数、C/A 码到 P 码的交接字及卫星工作状态。

按目前的设计，导航电文包括在一帧数据之中，一帧数据包含 1500bit，历时 30s（50bit/s）。一帧电文分为五个子帧，每个子帧都包含有系统时间和交接字 HOW。每个子帧由 10 个字组成，每个字 30bit，第一子帧包含时钟校正参数及电离层模型改正参数。第二、三子帧为卫星星历表。第四子帧为由字母和数字混合编制的电文。第五子帧是全部 24 颗卫星的日程表之一部分（由 25 帧构成一个完整的日程表）。

每一个子帧都是以遥测字 TLM 和交换字 HOW 开始的。交接字主要是向用户提供 P 码的 Xi 子码自一星期开始的周期计数 Z，以便于任一 6s 子帧结束时自 C/A 码转至 P 码捕获。遥测字开头 8bit 作为捕获导航数据的前导，其余主要是供控制部分使用的信息，以确定卫星每天校正的精度，用户接收机一般不必译出。表 7.4-1 给出遥测字 TLM 和交接字 HOW 的构成。

表 7.4-1 TLM 字和 HOW 字

TLM				HOW			
		+	P6			+	P6
前导	遥测电文			Z 计数	姿态同步		
+表示 2 个无信息意义比特				P6 表示 6bit 奇偶效验			

2.4.5 GPS 信号的接收

卫星所发送的 GPS 信号是一种可供无数用户共享的信息资源。所以用户需要一种能够接收、跟踪、变换和测量 GPS 信号的接收设备，也就是 GPS 信号接收机，以便测出 GPS 信号从卫星到接收天线的传播时间，解释出 GPS 卫星所发播的导航电文，实时地计算出测站的三维位置，乃至三

维速度和时间。

GPS 用户设备主要包括有 GPS 接收机及其天线，微处理器及其终端设备和电源等。其中接收机和天线是用户设备的核心部分。

如果把 GPS 信号接收设备作为一个用户测量系统，按其结构和作用可以分为：

- (1) 天线（带前置放大器）。
- (2) 信号处理器，用于信号接收、识别和处理。
- (3) 微处理器，用于接收机的控制、数据采集和导航计算。
- (4) 用户信息传输，包括操作板、显示板和数据存储器。
- (5) 精密振荡器，用以产生标准频率。
- (6) 电源。

2.4.6 GPS 系统定位误差与几何精度系数

GPS 定位测量的主要误差来源有三个方 面：与 GPS 卫星有关的误差、与信号传播有关的误差、与接收设备有关的误差。误差种类见表 7.4-2，其中，卫星星历误差、电离层折射误差、对流层折射误差是影响 GPS 定位精度的主要因素。

表 7.4-2 GPS 定位误差的种类		
误差来源	误差种类	对距离的影响 (m)
GPS 卫星	卫星星历误差	1.5~15
	卫星钟差	
信号传播	相对论效应	1.5~15
	电离层折射误差	
	对流层折射误差	
接收设备	多路径误差	1.5~5
	接收机钟误差	
	相位中心位置误差	

2.4.7 差分 GPS 定位

为了消除 GPS 卫星钟差、轨道误差、大气传播误差等影响，在利用 GPS 定位时广泛使用差分 GPS 定位技术。根据差分 GPS 基准站发送的信息方式可将差分 GPS 定位分为 4 类，即：位置差分、伪距差分、相位平滑伪距差分和相位差分。这 4 类差分方式的工作原理是相同的。即都是由基准站发送改正数，由用户接收并对其测量结果进行改正，以获得精确的定位结果。所不同的是，发送改正数的具体内容不一样，其差分定位精度也不同。

2.4.8 NavTrac GPS 导航仪

NavTrac GPS 导航仪是美国 Trimble 导航公司的产品，它是单频、三通道、可接收差分 GPS 信号的 C/A 码 GPS 导航仪，可用于导航定位。

与其他 GPS 导航仪相比较，NavTrac GPS 导航仪的最大特点就是增加了图形显示功能，它可显示经纬度格网及航迹，可用图形显示航迹偏差。当不能用 GPS 卫星定位时，NavTrac GPS 导航仪可自动转换到外部传感器（如罗兰 C 或罗兰 A）方式或推算方式进行导航，NavTrac GPS 导航仪可用于陆上、海上及空中的导航。

NavTrac GPS 导航仪的组成如图 7.4-22 所示，它由接收机与天线（包括前置放大器）组成。另外可选配电源变换器，通过接口选配罗经、计程仪、罗兰 C 导航仪和计算机等仪器。

其主要性能与特点如下：

- 1) 五种工作方式：GPS 方式、差 GPS (DGPS) 方式、

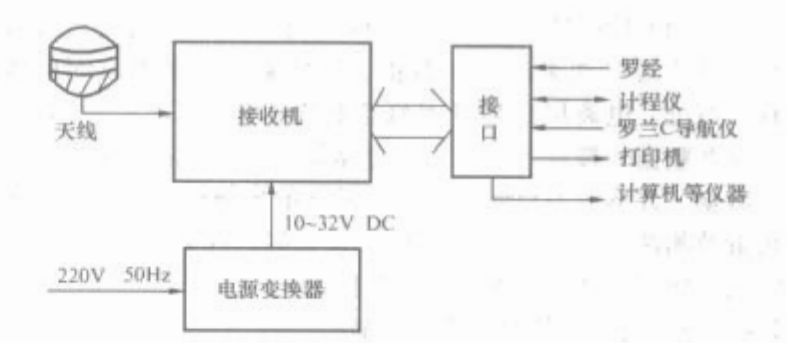


图 7.4-22 NavTrac GPS 导航仪的基本组成

外部传感器 (EXT) 方式、推算 (DR) 方式、模拟 (SIM) 方式。

- 2) 液晶屏幕显示（可显示图形）。
- 3) 可存储 500 个航路点及 100 条航线。
- 4) 工作频率 1575.42MHz。
- 5) 定位精度。
GPS 方式：C/A 码定位精度。
DGPS 方式：3~5m。
- 6) 两个 RS422 I/O 口。
- 7) 电源 DC 10~32V (12W)。

3 无线电导航

3.1 概述

无线电导航，是接收导航台发射的导航定位信号，并以导航台作为已知点，实时测定运动载体的在航位置和速度，进而完成导航。

无线电导航是目前广为发展与应用的导航手段，它不受时间、天候的限制，定位精度高、定位时间短，可以连续、实时定位，并具有自动化程度高、操作简便等优点。

从 20 世纪 20 年代初，无线电技术开始用于导航至今，由于它和其他导航技术（如惯性导航、天文导航等）相比，具有下列特点：

- (1) 受外界条件（如昼夜、季节、气象条件等）的限制较小。
- (2) 测量导航参量的精度较高，测量速度快。
- (3) 可靠性高，经济效益好。

因此，无线电导航技术得到了迅速的发展，广泛应用于航空、航海及航天等事业中。

无线电导航系统种类较多，典型的有罗兰 A、罗兰 C、奥米伽、测向仪等。按定向原理又有测向、测距、测距差之分。一般测距对时间同步的要求比较高。实践上多使用测距差的双曲线定位体制。20 世纪 60 年代，我国在沿海地区布设了罗兰 A 台链。90 年代，又分别在南海、东海和北海布设了罗兰 C 台链，我国称其为长河二号系统，在我国沿海的绝大部分海域（离发射台 1000~1200n mile）都可以使用长河二号系统获得较高的导航定位精度。长河二号系统是一种中远程高精度的大型无线电导航系统，在无线电导航领域，它属于脉冲—相位双曲线体制。长河二号系统与国外的罗兰 C 系统兼容，其工作原理、信号格式完全相同，因而可以对国际开放，使进入我国海域的船舶都能用其导航定位。

3.2 基本原理

3.2.1 脉—相测距差系统的工作原理

脉—相测距差系统利用测量天波到来之前（38μs 前，测量点通常选在脉冲前沿的 30μs 处）的载频相位差作精测，

既能提高精度,又可避免脉冲内的天波干扰;利用测量主、副台脉冲信号包络作粗测,可以消除多值性。

3.2.1.1 理想情况下的信号时间关系

如图 7.4-23 所示, M 为主台、S 为副台, 基线长度为 d , 接收点 P 到两台距离为 R_m 、 R_s 。若主台辐射脉冲信号为

$$e_m = U(t) \sin \omega t \quad (7.4-10)$$

式中: $U(t)$ 为脉冲信号的包络函数; ω 为载波角频率, $\omega = 2\pi f$ 。

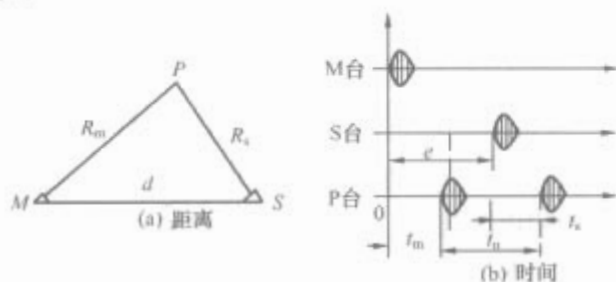


图 7.4-23 信号的时间关系

副台在收到主台信号后, 延迟一个编码延迟 Δ 后再发射形状同主台的脉冲信号

$$e_s = U(t - e) \sin \omega(t - e) \quad (7.4-11)$$

式中: e 为发射延迟, $e = \beta + \Delta$; β 为信号在基线上的传播时间, $\beta = d/c$; Δ 为编码延迟。

接收点 P 收到的主、副台信号分别为 (不考虑信号传播过程中的衰减)

$$e_{PM} = U(t - t_m) \sin \omega(t - t_m) = U(t - t_m) \sin \phi_m \quad (7.4-12)$$

$$e_{PS} = U(t - e - t_s) \sin \omega(t - e - t_s) = U(t - e - t_s) \sin \phi_s \quad (7.4-13)$$

式中: t_m 为主台信号传播到点 P 的时间, $t_m = R_m/c$; t_s 为副台信号传播到 P 点的时间, $t_s = R_s/c$; ϕ_m 、 ϕ_s 分别为 P 点收到主、副台信号的载频全相位, $\phi_m = \omega(t - t_m)$ 、 $\phi_s = \omega \times (t - e - t_s)$ 。

在接收点 P 测量到的主、副台信号包络前沿的时差 t_n 和利用载频的相位差所得到的时差 t_N 是一致的

$$t_n = t_N = t_s - t_m + e \quad (7.4-14)$$

相位是周期性函数, 相位差可表示为整周数和余数部分

$$t_N = \frac{2N\pi}{\omega} + \frac{\varphi_p}{\omega} = N_1 T + t_\varphi \quad (N = 1, 2, 3, \dots) \quad (7.4-15)$$

式中: T 为载波周期, $T = 2\pi/\omega$; t_φ 为 t_N 中不足一个载波周期的余数部分, $t_\varphi = \varphi_p/\omega$ 。

在测量相位差时, 只能精确测出不足一周的余数 t_φ 部分。而利用测量包络的时差 t_n , 可以得到整数部分 $N_1 = (t_n - t_\varphi)/T$, 消除了多值性。 t_φ 的测量精度决定时差的测量精度。实测中, 同时测量两个主、副台的时差, 可得到两条位置线, 其交点便是舰船的位置。

3.2.1.2 消除多值性的必要条件

在实际测量中, 必有误差存在, 所测包络时差应为

$$t'_n = t_N + \Delta t_n \quad (7.4-16)$$

测相位差所得不足一周的余数部分

$$t'_\varphi = t_\varphi + \Delta t_\varphi \quad (7.4-17)$$

式中: Δt_n 为测包络时差的误差; Δt_φ 为测相位差的误差。包络时差减去相差除以周期 T 可得整周数的观测值

$$N = \frac{t'_s - t'_\varphi}{T} = N_1 T + \frac{\Delta t_n - \Delta t_\varphi}{T} \quad (7.4-18)$$

式中: N_1 为整周数的实际值; $\Delta t_n - \Delta t_\varphi/T$ 为观测中的误差部分。因为 N_1 为正整数, 可对 N 值按四舍五入法取整数部分来获得 N_1 值。考虑到误差部分有正、负两种可能, 为了不影响从 N 中获取 N_1 的准确性, 对误差部分的要求为

$$|\Delta t_n - \Delta t_\varphi| < \frac{T}{2} \quad (7.4-19)$$

若不满足上述条件, 则可能造成错误的进位。由于 $\Delta t_\varphi \ll \Delta t_n$, 因此可得近似条件

$$|\Delta t_n| < \frac{T}{2} \quad (7.4-20)$$

Δt_n 应为包络测量的最大误差, 载频相位差的单值相宽为 T ($10\mu s$), 只有当 $|\Delta t_n|$ 小于 $5\mu s$ 时, $\pm \Delta t_n$ 的范围才小于 T , 在此范围内才能确定出一条精测位置线。

3.2.2 多值性的消除方法—周期识别

在脉—相测距差系统中, 利用脉冲包络的特征, 对包络函数进行采样测量, 控制相位采样脉冲准确地落在某一特定载频周期的过零点附近, 再由相位跟踪电路将相位采样脉冲对准在该载频的过零点上。主、副台相位采样脉冲间隔就是所要测量的时差, 这样, 消除了多值性, 同时也获得了精测时差。在脉—相测距差系统中常把消除多值性称为“周期识别”, 而用于包络函数采样的脉冲就称为周期识别采样脉冲。为确保消除多值的可靠, 要求周期识别控制误差小于 $T/2$ 。

目前, 周期识别的方案很多, 从识别信息的提取方法上看, 可大致分为两类: 包络识别法和射频采样法。

(1) 包络识别法。包络识别法是从同步检波后的信号包络上提取识别信息, 一般要对脉冲包络作波形变换以获取包络采样特征点。经波形变换后的脉冲包络称为导出包络。形成导出包络的方法一般有二次微分法、一次微分减包络法、延迟倒相相加法等。这类方法直观, 容易调整, 实现包络零点连续跟踪方便, 早期接收机中常用。缺点是需要低通滤波器, 易造成包络的失真和延迟。

(2) 射频采样法。目前接收机中常用的周期识别方法是射频采样法, 它是从信号的射频或变换的射频上提取周期识别信息。在经过自动搜索、天地波识别和相位跟踪后, 已使相位采样脉冲跟踪在所需信号地波某一射频相位正向过零点上, 如从包络起始点向后的 $10\mu s$ 、 $20\mu s$ 、 $30\mu s$ 、 $40\mu s$ 等处, 尚存在多值性, 需要进行周期识别, 使相位采样脉冲落在 $30\mu s$ 处。射频采样的周期识别方法也很多, 常见的有计算和函数法、识别第一周期法及变换射频形成特征识别点等。

1) 计算和函数法。计算和函数法是利用射频脉冲信号中不同周波的峰值不等的特性来进行周期识别的。如图 7.4-24 所示, 从信号脉冲的起点开始, 每个周波的最大幅值都不等, 它遵循包络波形函数所确定的规律而变化。由于信

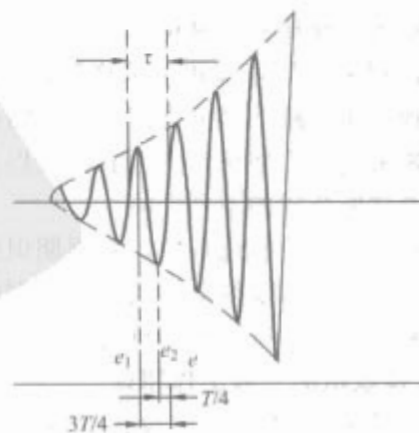


图 7.4-24 计算和函数法

号的强弱也要影响每个周波值的大小,所以单靠周波幅值绝对大小是不能识别周期的。但周波幅值的相对关系只取决于包络函数,而与信号的强弱无关,所以可用相邻两个半周的幅值比较来可靠地识别周期,这就是“和函数”周期识别的依据。

2) 识别第一周期法。识别第一周期法是利用判别信号有无进行周期识别的,其原理如图 7.4-25 所示。接收机对接收信号进行硬限幅,使信号成为方波,定时分频电路产生采样脉冲 e 、 e_1 和 e_2 。在二阶锁相环路的控制下,相位采样脉冲对信号载波的正向过零点进行相位跟踪。周期识别采样脉冲 e_1 、 e_2 的间隔为载波周期 T 。 e_1 与 e 的间隔由 e 应跟踪的周期位置而定,如要求 e 跟踪在第 n 周末的正向过零点上,则 e_1 在 e 之前 $nT+T/4$ 处。

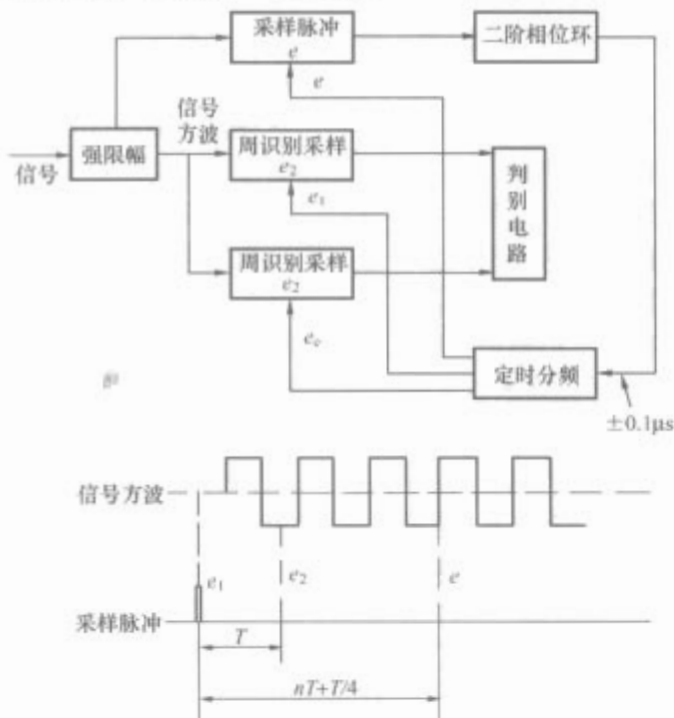


图 7.4-25 识别第一周期法原理图

在正常情况下,相位采样脉冲在规定的位上,则前位脉冲 e_1 采不到信号,而后位脉冲能采到信号;如果 e 在规定的位之前的某正向过零点上,则前、后位脉冲均采不到信号。因此,可根据前、后位脉冲所采信号的有无状况,由判别电路来控制采样脉冲的跳步。最终使相位采样脉冲自动移动并稳定在预定的采样点上。此种识别方法简单易行,但第一周期幅度太小,所以要求的工作信噪比较和函数法要高。

3) 变换射频形成特征点法。变换射频形成特征点法是利用波形变换的方法,在预定的相位跟踪点处形成一个换相点,作为周期识别的特征点,故也称相位倒转法。

射频采样法中,信号不用检波,避免了信号检波电路带来的能量损失、延迟、失真及电路引起的噪声干扰,因而可以获得较高的输出信噪比和识别可靠性。

由于周期识别采样脉冲和相位采样脉冲始终保持同步,在周期识别过程中相位跟踪部分继续工作,因此可以加大周期识别值的积累来提高周期识别的可靠性以提高信噪比,而不必担心信号漂移所造成的不利影响。

脉一相测距差系统接收设备中,对周期识别的信噪比要求高。如何在低信噪比的条件下提高周期识别的可靠性,是脉一相测距差系统接收设备中最困难的问题之一。

3.2.3 罗兰 C 接收机的一般工作原理

罗兰 C 接收机是典型的用户设备,由天线、天线耦合器、接收指示器三大部分组成,如图 7.4-26 所示。天线和

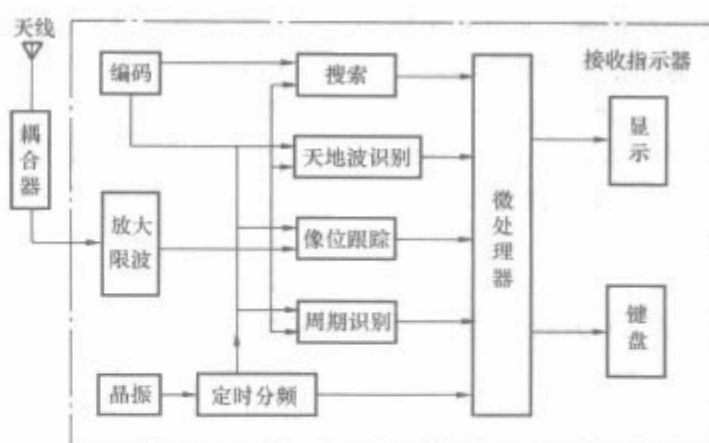


图 7.4-26 罗兰 C 导航仪原理框图

天线耦合器连在一起装在舱外较高的部位。接收指示器与耦合器通过专用电缆连接,天线接收到的信号经耦合器滤波、放大、阻抗变换后送往接收指示器。

接收指示器装在舱室内,它由接收通道部分、定时部分、数据处理部分、键盘和显示部分组成。其中,接收部分由若干放大器及滤波、限波和限幅、检波、导出包络、增益控制电路等组成,对接收的 100kHz 信号进行处理;数据处理部分由微处理器及其外围电路组成,进行信号搜索、天地波识别、相位跟踪、周期识别、测量计算等;定时部分由晶振、分频器、编码器等组成,产生机内所需采样脉冲等有关信号;键盘和显示面板进行人工交互、显示各种导航定位数据。



图 7.4-27 自动搜索环路框图

(1) 自动搜索和天地波识别。

1) 自动搜索。罗兰 C 信号的波形和参数是已知的,信号检测的任务只需判决在被测时间内信号是否存在。信号的自动搜索充分利用罗兰 C 信号的周期性、波形及信号编码,采用多次积累和相关检测计算后,将实测值与预定的门限值比较,进而判决信号的有无。

自动搜索环路包括晶振、分频器、编码器、极性鉴别器(又称比相器)、采样寄存器和微机等组成,如图 7.4-27 所示。在人工设定所需接收罗兰 C 台链的群重复周期 GRI 后,机内晶振、分频器、编码器产生与所要接收信号的 GRI 周期相同,并按主副台信号格式编码的基准脉冲。基准脉冲与信号在极性鉴别器中采来样比较,进行相位鉴别,再经积累、检测(判别),自动识别出主副台,将基准脉冲锁定在采样点附近的射频过零点上。

2) 天地波识别。接收机接收到的罗兰 C 信号是天地合成波,为了保证测量精度,要求用纯地波定位。地波选择的时间长度根据季节和时间不同而不同,但一般不超过 $37.5\mu s$ 。为避开天波干扰,采样点选在信号前沿 $30\mu s$ 处。天地波识别的任务就是使基准脉冲落在地波区。

天地波识别环路与自动搜索环路相似。天地波识别基本方法如下。

第一步,以搜索锁定位置为基准,向前 $500\mu s$ 内每隔

20μs 共布 25 对正交脉冲, 对信号进一步采样、积累。每个脉冲采样分别积累, 然后从前至后对应每个脉冲检测积累结果, 如果 50 个脉冲采样积累都达不到阈值, 说明基准脉冲已在 20μs 前, 不需移动采样脉冲可直接转入第二步识别。

第二是在基准前 10μs、5μs 处布设各一对正交脉冲, 分别采样、积累、检测并移动基准脉冲, 经多次相关检测后, 可确保基准脉冲锁定在包络起点后 0~30μs 以内的某一射频信号过零点上, 然后消去正交脉冲。

(2) 相位跟踪。在搜索完成后, 分频器保持 8 个基准脉冲送到采样器, 与外来信号进行比相, 当采样脉冲对准过出点时输出为零, 当采样脉冲对准信号射频的负、正半周时, 采样输出为负或正。采样结果送到计算机, 进行判别, 使分频输出的基准脉冲(采样脉冲)向后或向前跳步, 使基准脉冲始终保持对准信号射频零点, 这时便达到了信号跟踪锁定。

(3) 周期识别。基准脉冲锁定在信号地波部分的射频零点上, 即从包络起点向后的 10、20、30μs 处, 但仍然可能存在多值性, 还需进行周期识别, 使基准脉冲最后跳步移向 30μs 采样点。

(4) 时差测量。在完成相位跟踪和周期识别后, 主副台的每个脉冲信号上均有一个基准脉冲对准第三周过零点, 测量主副台时差时, 则是以对准第八个脉冲第三周过零点的基准脉冲为准的, 即测量主副台信号群中与第八个脉冲对应的基准脉冲间隔, 便得到主副台时差。经计算机定位解算, 可以求出用户的经纬度坐标。

3.3 长河二号系统

我国长河二号系统是参考美国的罗兰 C 系统设计的一种无线电导航系统, 该系统与国外的罗兰 C 系统兼容, 其工作原理、信号格式完全相同。长河二号系统由地面发射台、工作区监测站、台链控制中心和用户设备等几部分组成。

(1) 系统的主要特点。

1) 作用距离远: 系统的地波作用距离白天海上达 1200n mile、夜间 1000n mile, 陆地比海上小约 200~300n mile, 天波作用距离达 2000~2300n mile。

2) 导航定位精度高: 观测均方误差小于 0.4μs, 定位精度近区小于 0.25n mile、远区小于 1.2n mile, 近区重复定位精度可达 18~90m。

3) 无多值。

4) 抗干扰强。

(2) 系统台链组成。长河二号系统由 6 个地面发射台、3 个系统工作区监测站和 3 个台链控制中心构成 3 个台链, 台站分布在吉林、山东、上海、安徽、广东和广西等六个省市。每个台链目前仅包括 3 个发射台, 3 个台链相互连接, 其中有 3 个双工台。每一个台链包含一个主台、两个副台、一个监测站和一个控制中心。一般为了便于管理, 台链控制中心与主台设在一起。台、站和控制中心之间用无线或有线进行信息传递。

(3) 信号格式。为了提高发射信号的平均功率, 以利于消除噪声等干扰并增加作用距离, 长河二号系统中各导航台, 均以脉冲群的格式发射信号。主台发射九个脉冲为一群, 所有副台都发射八个脉冲。八脉冲间隔 1000μs, 主台第九个脉冲间隔 2000μs, 用于视觉识别主、副台及为用户闪烁告警。

每个脉冲的前沿定义为:

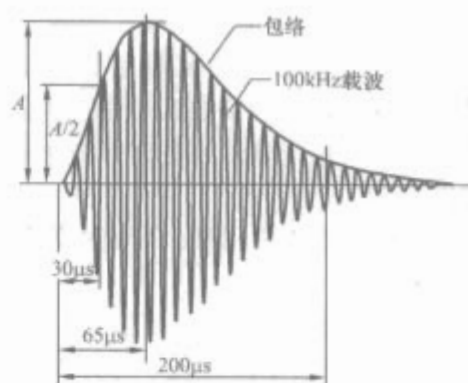


图 7.4-28 脉冲的波形

$$\begin{cases} x(t) = A(t-\tau)^2 \exp\left[-\frac{2(t-\tau)}{65}\right] \sin(0.2\pi t + PC) & (\tau \leq t \leq 65 + \tau) \\ x(t) = 0 & (t < \tau) \end{cases} \quad (7.4-21)$$

式中: A 为归一化常数; τ 为包周差; PC 为相位编码, 用弧度表示, PC 为 0 叫正编码, PC 为 π 称为负编码; t 的单位为 μs 。每个脉冲的波形如图 7.4-28 所示, 载波频率为 100kHz, 周期为 10μs。罗兰 C 脉冲的宽度大约为 200μs。脉冲前沿较陡, 脉冲包络在 30μs 处的幅值约为峰值的 60%, 信号的峰值约在 65μs 处。

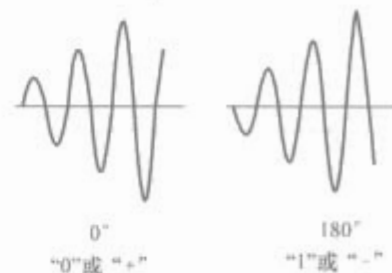


图 7.4-29 两种相位调制

(4) 脉冲群的相位编码。脉冲群中各脉冲载波的起始相位按一定的规律变化, 称为脉冲群的相位编码。如图 7.4-29 所示, 载波起始相位为 0° 时, 用 “+” 表示; 载波起始相位为 180° 时, 用 “-” 表示。主台第 9 脉冲不参与编码。信号调制方式见表 7.4-3。

主台的编码与副台的编码不同, 接收机以此作为识别主、副台信号的标记。一个完整的罗兰 C 编码周期由两个群重复周期 (GRI) 构成。

表 7.4-3 长河二号信号编码

	主 台	副 台
第一个 GRI 周期	++--+-++-	+++++--+
第二个 GRI 周期	+---+++++	+--+++--

(5) 主副台信号发射。为了便于识别主台和各副台信号, 并保证在工作区内各台信号不至于重叠和相互干扰, 各台信号是按时间分割制发射的, 即按主、副 1 和副 2 台……的顺序依次发射。如图 7.4-30 所示, M 表示主台, 副台依次用 W、X、Y、Z 表示 (长河二号系统只有两个副台)。

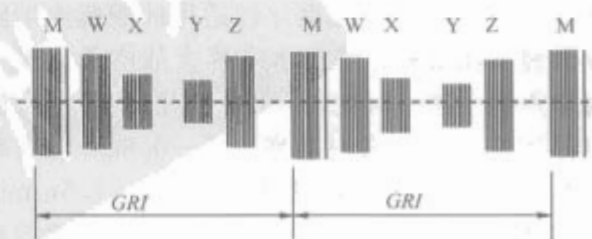


图 7.4-30 主、副台信号发射

各副台在收到主台第一个脉冲起,间隔一个编码延迟(Δ)再发射信号。为了保证时差测量始终为正值,副台信号发射时还须加上基线延迟。基线延迟是主台信号沿基线传播到副台所需的时间。编码延迟也称作保密延迟,战时可以根据需要而加以改变。

(6) 脉冲群发射及群重复周期。导航台发射脉冲群的重复周期称为群重复周期(GRI)。

测量采样点的信号电平只约有峰值的1/2,功率只约有峰值的1/4。系统采用编组工作方式,可弥补采样点有用功率的下降,而又不致对发射机峰值功率提出过高要求,且便于视觉发现和区分信号。

系统在每个脉冲重复周期中发射8个脉冲,在接收时,采用相关积累技术,每周期可使信号电压幅度增大8倍;而噪声则非相关,噪声电压有效值只增加 $\sqrt{8}$ 倍。故可使信噪比提高 $\sqrt{8}$ 倍。

(7) 发射台。发射设备是长河二号系统的核心设备,主要用于发射大功率、特定信号格式的导航信号。

长河二号系统发射设备主要由时频分系统、发射机分系统及发射天线系统三部分组成,如图7.4-31所示。其中发射机分系统又由控制部分和功率及波形形成两部分组成。在三个分系统之间由电缆相互联系,形成一个整体,发射标准的罗兰C波形信号。



图 7.4-31 发射设备

(8) 监测站。长河二号系统由于采用自由同步工作方式,监测站就成了整个台链的一个重要组成部分。台链的同步要按监测站所测得的数据进行校准。

监测站的主要设备是两部监测接收机。监测站接收机可同时测出主台和两个副台信号的时间差以及各台信号的包周差和信号信噪比等,所测得的数据通过调制解调器由有线或单边带电台以数据传输的形式传给控制中心。

(9) 台链控制中心。台链控制中心负责对整个台链实施监测和控制。控制中心设在主台,由电缆与主台连接,与副台、监测站间采用单边带电台联网,构成控制监测网络。

4 声纳导航

4.1 概述

现代声纳技术的发展始于20世纪。第一次世界大战后,声纳技术不断发展。1925年开始生产以回声方法测深的船用测深仪,1935年有几型比较适用的舰艇声纳陆续装备水面反潜舰艇和潜艇,第二次世界大战中又出现了航空声纳和海岸声纳。这一时期的声纳使用磁致伸缩换能器和人工压电晶体换能器,发射功率0.5~0.8kW,频率为超声频段(20~30kHz),主动探测距离为1~1.5n mile,被动探测距离为2~3n mile。总的来说,这一时期的声纳技术和声纳性能都还是比较落后的。第二次世界大战之后,

电子技术和计算技术的迅速发展大大推动了声纳技术的发展。20世纪60年代初出现了一批新型声纳。70年代由于大规模集成电路和数字计算机进入声纳技术领域,出现了全数字化声纳。80年代以后,一系列高速并行处理结构及器件的发展,使声纳信号处理技术以全新的面貌出现,为其实时处理提供了条件。

4.2 基本原理

(1) 目标距离的探测。当探测声纳系统进行工作的时候,发射机发射一串具有一定周期、一定频率的高频脉冲信号,其绝大部分的能量都经过换能器基阵辐射到海洋空间。如果声波在海洋空间传播的时候,碰上目标,则目标会产生声波反射,反射的信号有一部分会返回探测系统,探测系统接收到回波信号。目标与探测系统的距离就是由探测系统发射信号到信号反射回来之间的时间来判断。声波在海水中的传播是以直线传播,声波在海水中的传播速度一般可以默认为1500m/s。假设目标与探测声纳系统的距离为 R ,信号往返的时间为 T_R 。

$$R = \frac{1}{2}CT_R \quad (7.4-22)$$

测高声纳的精度主要受以下几方面影响:

- 1) 声速对测高精度的影响。
- 2) 载体的不稳定性 and 换能器的安装对测高精度的影响。
- 3) 水底地形对测高精度的影响。
- 4) 水底回波的判别方法对测高精度的影响。

(2) 目标角偏移的测量。角偏移的测量就是测定目标辐射声源或反射体相对于定向装置的方向。目标角偏移指方位角偏移和俯仰角偏移。在探测声纳系统中,对这两种偏移角的测量基本上是利用接收换能器基阵所形成的一定的方向性来确定的。例如:当接收基阵的波束轴对准目标的时候,接收到的信号是最强的。当波束轴偏移目标时,接收信号减弱。因此,根据波束产生最大值响应时,波束的指向,就可以确定目标的方向。而波束相对于参考方向的指向在事先是已知的,这是角坐标测量的原理。

(3) 多普勒测速的基本原理。众所周知,在换能器收发合置的情况下,换能器与目标均运动时,观察点所接收的信号频率为

$$f = \left(\frac{c+v}{c-v} \right) f_0 \quad (7.4-23)$$

式中: c 为声波在水中的传播速度; v 为目标与观察者的相对径向运动速度,且相向运动时,其符号为正; f_0 为声源发射信号频率。

从以上公式中可以看出,观察者听到的声波频率与声源的频率、声源与目标的相对运动速度之间有着一定的关系。因此,可以想象,当我们知道观察者听到的声波频率时,我们便可以求出这一相对运动速度,这便是多普勒计程仪最初的设计思想。图7.4-32描述了最简单的多普勒计程仪——单向单波束情况。

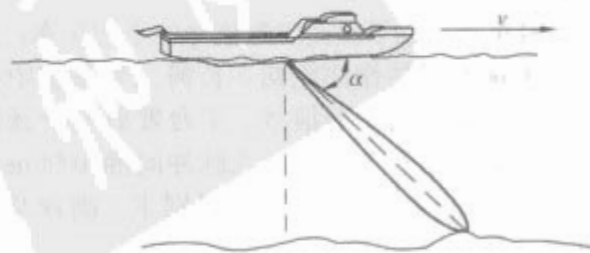


图 7.4-32 单向单波束多普勒计程仪原理

4.3 典型产品介绍及指标

(1) 测深仪。传统模拟测高声纳的主要技术特点是：①对信号的控制采用模拟式的强瞬时 AGC，能快速抑制回波幅度的突变；②用热敏纸对回波信号进行记录（电火花式记录器）；③由人工对记录标尺判读，也可加一个逻辑电路的高度数字化器，或是由单片机控制进行自动高度判读，提供与计算机的接口。

模拟式测高声纳的主要问题是：①核心的信号处理部分是模拟式的，接收机输出信号的起伏必然造成后端判读不准；②不便采用灵活、复杂的底跟踪技术；③纸带记录方式不能使数据精确再现，也不便保存和使用；④人工判读或是采用计数器判读的方式误差较大，数据不能直接供计算机自动绘制海图。

20 世纪 80 年代后期以来，芯片技术发展迅速。国外许多厂商不失时机地研制并推出了自己的数字式测高声纳。总结起来，数字式测高声纳的技术特点有如下几点：①有微处理器，从总体上统一控制信号的增益、底跟踪、高度的判别、数据记录和输出，做到各部分的协调配合；②可以精确地采样、保存回波信号，从而可以准确地判别回波的到达时间，得到精确的高度；③可以采用复杂的底跟踪策略，如跟踪门调节、异常数据处理以及自动进行丢失后的重新搜索，以得到稳定可靠的数据输出；④测量数据可以存入硬盘保存。

(2) 计程仪。声多普勒计程仪和声相关计程仪测得是相对于海底的速度，这两种声计程仪各有优缺点。多普勒计程仪的测速精度较好，能够在浅水中工作，并能够测量较低的速度，但在大深度时，还有一些问题需要解决，并且目前常用的多普勒计程仪常面临着复杂的声度补偿问题。声相关计程仪由于是垂直向下发射较宽的单波束，因而具有发射功率低、换能器体积小、重量轻、结构简单等优点，在与多普勒计程仪有相同大小基阵和发射功率的情况下，海底跟踪方式的工作深度要比多普勒计程仪大得多。但是声相关计程仪在浅水低速的工作情况时，测速精度有待于提高。

由于多普勒计程仪测得的速度精度高，所以由多普勒计程仪、罗经组成的推算航行系统与卫星导航或精密无线电定位系统共同组成的组合导航系统具有很高的精度，可用于水面舰艇和各种工程作业、海洋调查考察的船只。另外，多普勒计程仪测得的速度还可用作惯导系统的速度阻尼信号。

近 10 年来，相控阵技术的应用，消除了声多普勒计程仪的一个很大的误差源，使其性能有了显著提高。以詹纳斯 (Janus) 系统为代表的多波束系统的出现，不仅大大减弱了船舶颠簸与起伏所带来的干扰，还能够测量水平方向的两维速度，甚至还可以测得船舶的垂直运动速度。在测频的硬件模块方面，以往的多普勒测频模块都用模拟硬件实现，设备复杂、可靠性差、精度低。近来，数字信号处理技术已悄悄渗透进来。用数字方式对信号进行滤波、变换、估计、识别等处理，称为数字信号处理。数字信号处理具有精度高、灵活性好、可靠性一致性强、容易大规模集成等特点。

5 雷达导航

5.1 概述

雷达是英文 Radar 的音译，源于 Radio Detection and Ranging 的缩写，原意是“无线电探测和测距”，即用无线电方法发现目标并测定它们在空间的位置，因此雷达也称为“无线电定位”。第二次世界大战后，雷达作为一种重要的船

舶导航设备，在各国商船中迅速普及。1943 年美国正式推出船舶导航雷达，1949 年在英国利物浦首先装设了正规的船舶导航雷达系统。船舶导航雷达主要用于测定船位、航海避碰、观测海上浮标、船只和海岸、测定雷达作用区域内观测物的距离和方位。20 世纪 70 年代末发展起来的自动雷达标绘仪 (ARPA) 还能自动测定目标的航速、航向和碰撞的可能性以及选择最佳的避碰方案。今天的船舶导航雷达的功能已远远超过最初的目标探测和测距，还用于航海避碰，海上救援，完成船只进出港口的导航以及在结队航行是利用雷达保持队形，已成为船舶不可缺少的导航和避碰设备之一，对保障船舶航行安全具有举足轻重的意义。不仅大型、远洋船舶必须安装，渔船、游艇等各种小型船舶也已普遍安装导航雷达。

国际海事组织 (IMO) 规定了总吨 500t 以上的货船 (1999 年又下降到总吨 300t) 及所有客船都必须装备一台导航雷达，总吨 10000t 以上的船舶必须装备两台各自独立工作的导航雷达，同时规定总吨 10000t 以上的船舶还必须装备一台 ARPA。此外，IMO 对导航雷达和 ARPA 分别规定了性能标准。

自从第二次世界大战出现船舶导航雷达至今，船舶导航雷达经历了以下几个时期。第一时期：20 世纪 40 年代至 50 年代末。这一时期的主要特征是雷达系统中的器件全部为电子管，天线为抛物面型。第二时期：60 年代。这一时期的主要特征是半导体器件大量取代真空管器件，隙缝波导天线取代抛物面天线以及真运动显示的出现。第三时期：70 年代。集成电路芯片应用于雷达接收机和显示器，出现了采用小型机和微型机的避碰雷达。第四时期：80 年代至今。超大规模集成电路、微处理器、通用 CPU、信号处理专用芯、以及微波集成电路芯片的应用，使得各种复杂的信号处理和数据处理功能得以实现，船舶导航雷达的功能大大增加。

5.2 雷达分类

按照雷达的信号形式分类，目前的雷达可以分为：

1) 脉冲雷达。它发射的波形是矩形脉冲，按一定的或交错的重复周期工作，这是目前使用最广的。

2) 连续波雷达。它发射连续的正弦波，主要用来测量目标的速度。如需同时测量目标的距离，则往往需对发射信号进行调制。例如对连续的正弦信号进行周期性的频率调制。

3) 脉冲压缩雷达。它发射宽的脉冲波，在接收机中对收到的回波信号加以压缩处理，以便得到窄脉冲。目前实现脉冲压缩主要有两种：线性调频脉冲压缩处理和相位编码脉冲压缩处理。脉冲压缩能解决距离分辨力和作用距离之间的矛盾。在 20 世纪 70 年代研制的新型雷达绝大部分采用脉冲压缩的体制。

此外还有脉冲多普勒雷达、噪声雷达、频率捷变雷达等。也可以按其他标准对雷达进行分类，例如：

1) 按角跟踪方式分，有单脉冲雷达、圆锥扫描雷达、隐蔽锥扫描雷达等。

2) 按测量目标的参量分，有测高雷达、两坐标雷达、三坐标雷达、测速雷达及识别雷达等。

3) 按信号处理方式分，有各种分集雷达（频率分集、极化分集等）、相参或非相参积累雷达、动目标显示雷达、合成孔径雷达等。

4) 按天线扫描方法分，有机械扫描雷达、相控阵雷达、频扫雷达等。

5.3 脉冲式雷达基本原理

雷达技术是利用电磁波的二次辐射、转发或固有辐射来探测目标,获得目标其空间位置、速度、特征等信息的一个无线电技术设备。雷达所要探测的一切对象统称为雷达目标(简称目标)。雷达目标可以是空中的飞机、导弹、云雨、冰雹、人造卫星、宇宙天体,陆地上的山川、森林、地形、建筑物、工事、车辆、兵器、炮弹、人员等,也可以是海面上的目标。船舶导航雷达的主要探测目标是海面的舰船、航标、岛屿、岸边等。

船舶导航雷达的主要任务是根据目标回波判定目标和雷达之间的径向距离、相对方位,目标跟踪、目标报警等功能也是基于这两项基本功能来实现的。所以船舶导航雷达的首要的基本任务就是完成目标距离、方位的测定。

(1) 电磁波的工作特性。雷达工作的物理基础是电磁波,所以在阐述雷达工作原理之前,首先简述电磁波的工作特性,雷达正是基于这些特性才能正常工作。电磁波在介质中传播,遇到任何物体,若其电性能与传播介质的电性能存在差异,就会产生二次辐射现象。二次辐射是物质分子的等效电偶极子受电磁波强波振动产生的。由目标产生的二次辐射电磁波与原来的电磁波相互干涉叠加,会产生“反射”、“散射”、“绕射”三种情况。如果目标接受原电磁波辐射的那部分尺寸远大于原电磁波的波长,而且其表面非常平滑,各点的一次辐射电磁波的强度和分布都很均匀,叠加的结果只改变原电磁波的传播方向。而且满足入射角等于反射角的波动反射定律。这种情况称为反射。如果目标尺寸远大于原电磁波的波长,但其表面粗糙,各个单元的二次辐射指向不同,其强度与分布又极不均匀,具有随机性质,相互干涉叠加而形成“散射”。如果目标尺寸远小于原电磁波的波长,二次辐射电磁波与原电磁波相互干涉叠加,使电磁波传播方向不变,波阵面在传播中变化,结果使电磁波连续弯折绕过目标,朝其背后继续传播,这就是“绕射”。此外,还有一种特殊情况,当目标尺寸与电磁波的波长可以相比拟时,特别是当目标是一个导体,其指向与电磁波的电场矢量相平行,这时目标就相当于一个电偶极子,在原电磁波的强迫振动下产生“谐振”式的二次辐射。

除了完全绕射情况以外,反射、散射、“谐振”二次辐射都可以用来发现目标,对于大量目标来说,往往散射是主要的。为了发现目标,雷达可用某种形式向空间发射无线电波,电波传播路途中遇到目标后,发生二次辐射。其中一部分返回雷达处被接受,这样就可以判知目标的存在,获得有关目标的信息。

从本质上说,雷达工作波段的范围在电磁波频谱中没有根本的限制。任何装置,不论其工作频率如何,只要利用电磁波的二次辐射、转发来探测目标,获得其空间坐标,都属于雷达的工作范畴。任何频段的雷达的基本原理均相同,一般来说,较长的波长,雷达发射功率管可以达到的功率容量较大,接收机的噪声系数小,大气传播的衰减较小;在较短的波长,能获得较高的天线增益,方向性较好。工作波段的选择是根据雷达的具体使用条件和性能要求决定的。目前广泛采用的代码方法是 L 表示 22cm 波长为中心的 20~25cm 波段, S 波段代表 10cm 波长, C 波段代表 5cm 波长, X 波段代表 3cm 波长等。

航海雷达一般都采用公分波段的电磁波,不仅仅因为微波波段的定向天线容易制造,便于安装,还因为微波对于金属有强烈的反射,即使是木石之类也有相当的反射,这些都是

航海上很重要的。这种波段的电磁波能够穿过云雾雨雪而所受到的影响很小,所以不论在白天、黑夜及浓雾的情况下,只要在雷达探测距离内,对于海岸、护浪堤、浮筒、航道内往来的船只,海岸上的山地和主要建筑物以及海面上的礁石、冰山或甚至浮在海面上的救生圈等的距离和位置都能准确地被探测到,在雷达屏幕上显示出来,起到防撞和定位的作用。

(2) 雷达测距原理。雷达测距的物理基础是电磁波在均匀介质中具有等速直线传播的特性。电磁波遇到物体以后具有反射特性。电磁波由雷达发射后,传播到目标处,反射后又传播到雷达,往返传播的时间即为时延 t , 如图 7.4-33 所示。

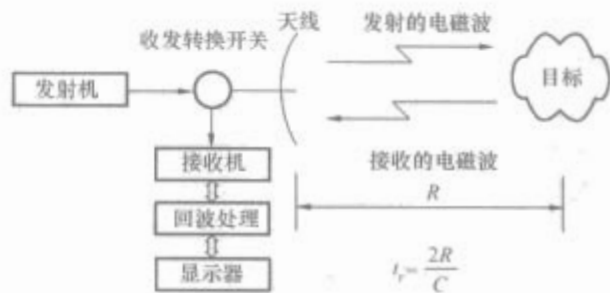


图 7.4-33 雷达测距基本原理以及组成部分

因为电磁波等速直线传播,在空气中的传播速度与在自由空间的传播速度是很接近的,所以目标的距离可以根据式(7.4-24)计算得

$$R = \frac{Ct_r}{2} \quad (7.4-24)$$

式中: R 为雷达和目标之间的直线距离; C 为电磁波在自由空间中传播的速度,数值为 3×10^8 m/s; t 为电磁波往返传播引起的时延。

(3) 雷达测方位原理。雷达测角的物理基础是电磁波在均匀介质中具有等速直线传播的特性,而且在超短波、微波及光波段能实现方向性图十分尖锐的定向辐射与接受。通常目标角位置指方位角和仰角,在船舶导航雷达中,因为主要是探测海平面上的目标,即要探测的目标与雷达处于一个水平位置,所以船舶导航雷达中所说的目标角度就是指方位角。雷达天线将电磁能量聚集在窄波束内,当天线波束对准目标时,回波信号最强,如图 7.4-34 所示。

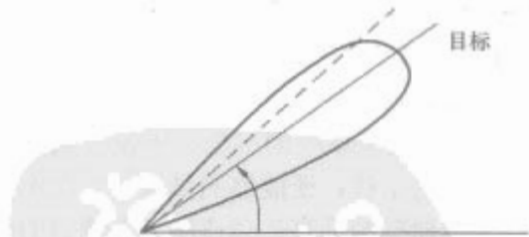


图 7.4-34 发射波波形

图 7.4-34 是一种常见的天线方向图,它的形状像一朵花瓣,所以称其为波瓣或波束。它有一对称的轴,如图中实线所示,沿轴的方向辐射最强,当目标偏离天线波束轴时,回波信号减弱,如图虚线所示。根据回波最强时的天线波束指向,就可确定目标的方向,这就是目标角坐标测量的基本原理。

当确定了如何判断天线方向对准目标的原则以后,就需要在目标回波最强时,有一定装置来获得天线的方向值。目前,船舶导航雷达数据处理系统通用的方位编码器及录取方法有三类:第一类是将模拟式的机械转角,借助于光点码盘及附属的电子设备,直接转换成方位数码,再由录取控制信

号录取目标方位数据；第二类是由雷达方位传递系统给出的两相或三相（再经过正余弦分解）的模拟方位同步信号，经相敏检波、A/D变换，形成方位正余数据，由软件求出目标方位数据，再由录取控制信号录取目标方位数据；第三类是将雷达同步发送机或分解器的模拟方位同步信号，借助于硬件和固件，直接给出方位数码，由录取控制信号直接录取目标方位数据。

对脉冲雷达而言，雷达的径向分辨率和它发射的脉冲宽度有关，径向分辨率等于脉冲宽度的一半。也就是说，当沿电磁波发射方向上的两个目标距离不超过脉冲宽度的一半时，雷达不能区分这两个目标。

5.4 国内外同类产品的现状

我国船舶导航雷达工业在20世纪50年代基本上是空白，各类船舶上所需的导航雷达几乎全部依赖进口，仅南京七二〇厂按前苏联图纸仿制生产了数台512型S波段舰载警戒兼导航雷达。直到60年代，船舶导航雷达工业才首先在上海开始起步。开始仿制并改进前苏联和英国的雷达产品，于60年代中期开始仿制样机的基础上批量生产，并自行设计了我国首台半导体雷达。

当前国内船舶导航雷达的研制、生产单位主要有四家，即凯歌雷达厂、辽宁无线电二厂、青岛无线电三厂、常州第四无线电厂。除凯歌雷达厂既生产大、中、小型导航雷达又生产自动雷达标绘仪和导航兼直升机引导雷达外，其余三家均生产中、小型导航雷达，各厂均有自己的特色和长处。

图7.4-35所示为上海广播电视集团凯歌雷达通信设备厂生产的762A显示系统，该系统配合天线和收发机即构成完整的雷达系统。

国外的主要生产厂商为日本的FURUNO、ANRITSU、JRC、CODEN，英国的RACAL、KH，美国的RAYTHEON，德国的ALTLAS，意大利的SELESMAR等公司，每年导航雷达的产量均要数千台，乃至数万台。

图7.4-36所示是美国RAYTHEON公司生产的RL80C彩色显示单元，可以联接功率2~10kW的上单元，最大探测距离可以达到72n mile。显示屏为10.4in的彩色LCD显示器，内部信息处理和控制在嵌入式计算机和专用集成电路（ASIC）。显示单元支持SeaTalk、NMEA和美国RAYTHEON公司自定的hsb2接口，可连接上单元、GPS、电罗经及鱼探等设备。每个显示单元都能够对所连接设备的信号进行处理，显示雷达扫描图、导航海图、目标数据等，也可以分上下半屏显示不同内容或者在一整屏中叠加雷达扫描图和导航海图。还能够将一个上单元的信号用hsb2总线串连至多个显示单元，不同的显示单元显示不同的图像或数据。



图 7.4-35 762A 显示系统 图 7.4-36 RL80C 彩色显示单元

6 综合导航系统

6.1 概述

20世纪50年代末，世界航运事业迅速发展，海上交通密度增大，船舶吨位愈来愈大，碰撞、触礁事故逐年上升，特别是超级油轮的出现后又提出了一个问题——如何节省燃料、降低营运费用。为此，各国科学家开始把原先用于航天上的综合导航技术引入船舶导航。1969年，挪威研制成功利用计算机进行避碰和导航的系统，并取名为数据桥，安装在2.2万t油船上，诞生了世界上第一套综合导航系统。

船舶综合导航系统，又称组合导航系统，就是将船舶上单独使用的各种导航设备，通过计算机有机地组合在一起，应用Kalman滤波等数据处理技术，发挥各单个仪器的优点，取长补短，使最后提供给用户的航向、速度、位置、姿态、水深等信息参数的精度、可靠性和自动化程度能得到极大的提高。综合导航系统已成为现代船用导航系统的重要配套设备，而军用舰船的导航系统更是离不开它，其设计日趋合理，各种不同类型的产品由国内、外产业界相继推出，同时涌现出一大批适合综合导航系统需求的理论、技术、算法和设备，因此，综合导航系统已成为当前导航技术的重要的发展方向之一。

从20世纪60年代开始，美国、英国、日本、德国、俄罗斯等工业技术先进国家，在微型计算机和电子集成化技术的推动下，竞相发展各种用途的综合导航系统。20世纪60年代末，美国已在以反潜为主要使命的7000T DD-963型导弹驱逐舰上首先装备了综合导航系统，采用了7个状态的卡尔曼滤波器对来自平台罗经、电磁计程仪、 Ω 接收机和NNSS卫星导航接收机的信息进行最佳数据处理与综合。以后美国在31艘“拉菲特”级导弹核潜艇上安装了军用综合导航系统、法国海军选用了以惯性导航为主的SAGEM综导系统、德国选用了NACDS25综合导航系统和F-122护卫舰选用了INA综合导航系统以及加拿大国防研究院为加拿大海军研制了17个状态扩展卡尔曼（Kalman）滤波的综合导航系统等。此外用于巨型油轮和集装箱船的综合导航系统发展也非常快。我国船舶综合导航系统的研究起步于20世纪70年代末，经过30多年的努力，发展也很快，已广泛用于船舶、潜艇、测量船及其他舰船。截止20世纪末，国内外已先后推出几百种不同系列的综合导航系统安装在各种不同类型的船舶上。

21世纪初期的船舶综合导航系统将成为民用和军用船舶的配套设备，智能化、小型化、多功能、多模式、高精度、高可靠性将是其主要的发展趋势。

(1) 对综合导航系统的微型化、自动化要求继续升级。随着微处理机性能的提高，综合导航系统将优先采用多微机分布式结构或局域网连接，使数据交换、处理能力、数据利用率大大增加。

(2) 对高可靠性、高精度的要求将是设计的重要指标。为此可采用两套并行独立系统互为备份的方案，以提高设备本身的可靠性和冗余性，对系统管理软件应增添自检、报警、容错等功能。为提高系统的产品精度，新型的导航传感器将扩充到综合导航系统中，同时将研制和使用高效能的卡尔曼滤波器。

(3) 综合导航系统的功能更需完善。综合导航系统除有定位、导航、避碰、自动驾驶等功能外，还可把主机的控制、通信系统、装载计算等功能也合并到综合导航系统之

中,使综合导航系统成为驾驶台上自动控制的中心,并逐渐向全船自动化方向发展。

(4) 综合导航系统的信息源不但有来自本船的各量测设备,还将有来自通信卫星、问讯系统、全球海上遇险和安全系统等各种途径获得本舰和其他船舶的位置、航向、航速以及机动参数等更可靠更正确的信息。综合导航系统将本舰状态通过通信卫星发往岸上指挥中心。这样从通信卫星上收到的信息不但有本船的,也有其他船舶的,这样将使综合导航系统的精度大大提高。但军用综合导航系统为防止泄密,可通过数据链来获取邻舰之间的导航信息。

(5) 将规范的推行高性能的故障自检和诊断技术,能正确地系统主要硬件芯片和元器件、系统的工作状态、通信状态等作出自动检测,故障定位到模块。利用专家知识对各种传感器的状态实现监控和预报。

(6) 人工智能技术也将进一步推广用于综合导航系统,实现导航设备的自管理,从而减轻航海和观通部门的负担,提供决策辅助。基于知识的航行专家系统(知识+推理=专家系统)是人工智能导航的重要应用分支,它提供系统的管理和决策辅助,负责组织、协调、参与容错导航和综合导航。其实现将依赖于高性能计算机硬件、分布式结构推理及专家系统软件 and 知识组织。提高系统智能化程度,已是综合导航系统发展的方向之一,如开发自动化程度极高的人工智能避碰系统,将大大减轻驾驶人员的脑力劳动强度。

6.2 基本原理

6.2.1 系统配置原则

(1) 综合导航系统的基本组合类型和配置规模,主要由所装对象(船舶)担负的日常航渡任务的需求来决定的。不同类型的船舶可选不同的导航设备(或系统)来构成该船舶的综合导航系统。综合导航系统的硬件设备的配置,除应考虑能圆满完成本系统的使命和任务外,还应适应船舶所完成的使命和任务对导航、定位的需求。

(2) 综合导航系统应能灵活地转换各种组合模式,以保证在不同的海域或设备故障、卫星失灵时,系统仍能连续可靠地提供导航数据。

(3) 综合导航系统提供给作战系统的导航参数、精度、输出形式和路数,根据有关标准、规范的具体情况商定。

6.2.2 系统的功能要求

(1) 导航功能要求。应能提供多种导航工作模式以及导航必需的信息,能优化处理传感器信息,并能实时地推算船舶的位置。

(2) 航行管理及报警功能要求。

1) 航路点导航:实时船位到达航路的方位、距离;实时船位到达航路点应采取罗经航向;按实时航速计算到达航路点所需时间及到达时间;到航路点的航迹向及偏航角。

2) 航线导航:将选定航线的起点、各转向点及到达点编号后,按顺序保存入系统;每经过一个航路点应自动更换下一个航路点导航;船舶返航时给系统发一反序导航指令,船舶能沿原航线返航。

3) 定点导航:当船舶执行定点漂角作业时能将定点的经度、纬度键入系统;显控台不断显示船舶相对定点导航参数(航向、航速、转向、时间)用以操纵船舶。

4) 导航报警:应有偏航报警(当船舶偏离计划航线的距离超过设定门限时报警)、接近目标报警(当船舶进入前方航路点设定的门限距离时应报警)、避险报警(当船舶进入障碍物的安全限制时应发报警信号);定位报警(当船舶

漂离定点设定的距离时应发报警信号)、定时报警(到达设定时间或间隔时间报警)等功能。

(3) 信息接口功能要求。具有符合船舶有关标准、规范的数字量(网络或点对点接口)及模拟要求的接口功能,其接口的路数、信息传输的格式和速率等应满足相应的船舶对导航信息的不通要求。

(4) 自动驾驶功能要求。将综合导航系统与自动操舵仪连接起来,形成自动驾驶系统,可自动完成驾驶功能。还具有防止舰船之间互相碰撞的避碰功能。

6.3 系统构成

6.3.1 基本组合类型和结构形式

综合导航系统的基本组合类型和结构形式,根据船舶综合导航系统的装船对象和需求情况,各国已研制出各种不同的综合导航系统,其共同要求是以一种连续定位的导航系统为基础,用连续或间断的测位系统对不同的导航信息进行综合处理或修正,以完成不同目的导航的任务。

以平台罗经、速度计程仪(相对/绝对计程仪)构成的推算船位系统,主要适用先进的水面船舶和常规动力潜艇中。根据测位设备的类型,与测位设备(卫星导航仪、无线电导航仪、天文仪器)组成综合导航系统。其组合模式有推算舰位/罗兰 C、推算舰位/GPS 等。

以惯性导航系统(INS)为中心的综合导航系统,主要适用于定位精度要求较高的特种舰船,如石油勘采船、靶场测量船、核潜艇、航空母舰等。根据校正设备的类型不同,可组合多种不同的组合模式:天文/惯性导航系统、GPS/惯性导航系统、无线电导航仪/惯性导航系统、多普勒计程仪(或声纳)/惯性导航系统。

以陀螺罗经、速度计程仪构成推算船位系统与其他测位设备 GPS、GLONASS、北斗、罗兰 C、导航雷达组成的兼有避碰功能的综合导航系统,主要适用于一般的大型水面船舶。

推算舰位,即根据航向(K)、航速(V)信号由初始位置开始,一步步地向前推算(由计算机进行)。但是,陀螺罗经和速度计程仪的误差受海流和风流影响,会使推算舰位产生较大误差。又因推算过程的每一步都是在前一步基础上进行的,因此误差是随时间积累的,但又具有短时间内稳定的特点。罗兰 C、GPS 等误差不随时间积累,但由于干扰、传播路径噪声跳周、跳相、信号失锁等因素,可使其误差的短期特性不佳。而将两类信息进行组合滤波,具有取长补短的互补作用,可提高导航定位精度和可靠性。

综合导航系统是以计算机(硬件)为核心,以最佳统计理论为方法,将舰上各种单一的导航设备的信息采入计算机,经过综合处理,相互取长补短,得到本舰最佳导航参数,形成一个统一的整体,这样不但提高了导航信息的精度,也扩大了单一导航设备或系统的功能,如导航、避碰、自动驾驶及各种航海作业,为其他系统提供所需的运动参数和姿态信息。

图 7.4-36 是一个具有共同特性的一般综合导航系统结构框图。

综合导航系统的硬件部分,以微处理机为核心(单板机、单片机或系统机),配以输入、输出接口及显控台、记录、打印、绘图等设备组成。量测传感器及控制反馈传感器是综合导航系统的信息来源,是数据处理的依据。综合导航系统除要求各传感器应处于正常工作状态外,还需掌握其误差特性(系统误差和随机误差)。信息来源应有冗余度,以

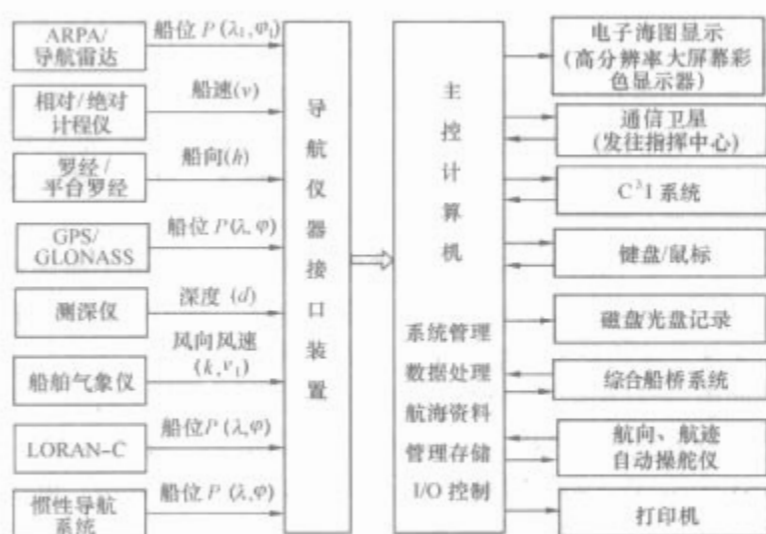


图 7.4-36 综合导航系统结构框图

保证综合导航系统的自动取舍，从而也保证了系统的高可靠性。其中，陀螺罗经提供舰艏向（瞬时航向）；平台罗经提供舰艏向和水平姿态角（纵横摇角）；电磁计程仪提供相对航速（相对航速也可采入轮转数换算得到）；多普勒计程仪提供绝对航速；罗兰 C 和 GPS 提供本舰位置（ λ, φ ）；导航雷达提供岸标的方位距离或经解算得到的本舰位置，也可提供活动目标的相对位置；风向、风速仪提供以本舰为基准的相对风向、风速。舵角指示器提供瞬时舵角。

(1) 输入接口：是计算机与各导航信息传感器、导航显控台的硬界面，通过它把传感器的模拟量经 A/D 转换变成数字量接入计算机，把指挥员的命令送入主机，同时使计算机与数字量传感器终端实现通信匹配，通常用串行通信实现。

(2) 输出接口：是计算机与数据用户、控制对象之间的硬界面，通过它向指控系统、导航遥控台以及记录、打印、绘图等外设提供本舰运动参数，并将数字量经 D/A 转换为模拟控制量，对车钟、舵机实施控制。还可通过通信卫星将本舰数据发往岸上指挥所或旗舰。

(3) 计算机：其运行速度和容量应能满足综合导航系统的需要，并应有一定的冗余度。此外，还应有防潮、防热、抗冲击、抗干扰的能力，能适应海上恶劣环境下的长期工作，一般应采用加固机形式。

(4) 导航显控台：是指挥、操纵人员获取导航数据、掌握本舰运动状态及向综合导航系统发布命令的人机界面。显控台上一般都有显示屏和各种专用或通用键盘。有的还配有电子海图装置，能根据需要显示不同的比例尺、不同层次的电子海图画图。

(5) 数据记录设备：通过绘图仪、磁盘、打印机等存储介质，把本舰运动参数有关导航数据实时记录下来，便于事后分析、总结和判明责任。

综合导航系统的软件可分为系统管理软件、数据处理软件和功能软件三部分。

(1) 系统管理软件：又称操作系统，它全面管理综合导航系统中的中央处理器的时间和存储空间、外部设备和来自各传感器的导航信息、以及调度数据处理软件和功能软件而设计的一套程序。另外还应具有自检、故障分析、告警以及计算机网络通信等功能。

(2) 数据处理软件：包括对来自导航传感器的导航信息进行剔除、时间归一、系统误差改正、大地坐标系归一以及数据压缩等导航信息预处理软件和预处理后的数据进行状态最优估计的软件。

(3) 功能软件：在系统管理软件的统一管理下，依据数据处理软件给出本舰的估计状态，按照显控台上指挥员的命令进行解算和控制的软件。

综合导航系统应具有如下主要的特点：

(1) 能有效地利用来自各种传感器的导航信息，能大大提高系统的导航、定位精度和系统的性能。

(2) 能利用故障自动检测和软件控制设备，实现不同组合工作方式的自动转换，使系统有足够的测量余度，提高了系统的可靠性。

(3) 具有航路点导航、计划航线导航、导航报警、自动驾驶等功能，提高了导航定位的自动化程度。

(4) 具有避碰功能和配有电子海图显示与信息系统，提高了航行安全性和经济性。

(5) 具有航海日志生成、显示、记录、绘图等功能，便于备查。

6.3.2 定位精度要求

(1) 新型电子武器系统对定位精度的需求。自 20 世纪 70 年代开始，弹道导弹的射程从 1200n mile 提高到 1500~2500n mile，其中，精度要求从 800m 到 50m，因此要求导航设备的定位精度从表面上 1.6n mile/30h 提高到 0.2n mile/(24~72h)。

定位精度要求较高的舰船是战略导弹（射程大于 1000km）核潜艇、航天测量船等，其中要求舰船的定位精度为：位置（经度、纬度）：1~5m；航向 40''；水平姿态：10''；绝对速度 $\pm 0.07\text{km}$ 。

(2) 国内外现有主要导航设备的性能指标。

1) 卫星导航定位设备。全球卫星定位设备 GPS、DGPS 和 GLONASS 接收机的定位精度受运行的卫星的数量（24 颗）、观测到卫星的仰角（150°）的影响，GPS/GLONASS 的组合接收机，采取两种不同频带组合可适当提高其定位精度。目前水面舰船和常规动力潜艇一般采用 GPS/GLONASS 的组合接收机，定位精度不大于 10m（2d RMS HDOP ≤ 4 ）。

2) 惯性导航系统。为进一步提高惯性导航系统的定位精度，美国、德国、法国在 20 世纪 80 年代之后进一步探索，以满足导弹核潜艇高精度、高隐蔽性要求，即采用改进惯性导航系统本身性能和与静电陀螺监控器（ESGM）组合的办法。解决了高精度和长的重调周期问题，研制出 MK2mod7 INS/ESGM 组合系统，其系统精度为：位置为（0.2~0.3）n mile/72h（CEP），航向为 40''（RMS），水平为 10''（RMS），重调周期为 15 昼夜。

为适应水面舰艇和攻击型核潜艇现代化改装的需要，美国采用平台旋转技术，将惯性平台与电子控制装置组合为一体装在主体设备内，采用的微型静电陀螺和加速度计为组件，安装在平台内。系统具有锁定、对准、校正、导航四种工作方式。如美国双小型平台式系统（AN/WSN-1, AN/WSN-3A）改装后系统精度相比 MK2mod6 型平台罗经。航向提高 62%，水平提高 4%，位置提高 68%。

3) 平台罗经与航向姿态基准系统。作为中等精度舰船用的惯性系统，平台罗经 MK29mod3、PL41/MK3 型和捷联式的航向姿态基准系统 LSR-85 型，在二自由度挠性陀螺和加速度及系统校准、控制等技术已经发展到成熟阶段后，为了增加机动性能（定位），平台罗经增加了短期惯导功能，并利用 GPS 进行校正，以提高系统精度。如平台罗经用于潜艇，为本艇提供航向、水平姿态基准、短期惯导定位和对地速度，其短期惯导定位精度 1n mile/h（CEP）。

6.3.3 对水平姿态精度的要求

(1) 水平姿态信息精度取决于陀螺仪、加速度计本身的固有特性、加工精度和信息传输两个重要环节。现有的国内外平台罗经、惯性导航系统的水平姿态信息精度大部分都是在角分级,精度最高者为静电陀螺。

(2) 根据国内外相关资料记载,采用双通道(粗、精)测角系统可提高信息输出精度。

1) 双峰值采样旋转变压器——数字转换。平台罗经的姿态角模拟发送精度要求 \times' ;数字转换精度要求 $\times\times''$ 。因此测角元件大部分采用粗、精组合的多极旋转变压器,其粗精比例通常为1:16和1:30,可以实现姿态精度的进一步提高。

2) 采用粗、精组合的双速专用外处理器。美国 Analog Device 公司生产的一种专用处理器,粗、精传动比为1:36、1:30和1:9;根据用户的不同需要还可生产粗、精传动比为1:2和1:35等不同的专用处理器。

6.3.4 卡尔曼滤波技术的应用要求

(1) 卡尔曼滤波技术。卡尔曼滤波方法又称作“最小方差线性递推估算滤波法”,是对随机信号作估计的有效算法之一。卡尔曼滤波算法采用状态方程描述被估计量的动态变化规律,在时间域内设计滤波器,采用线性递推形式对观测量进行处理,实时地给出系统状态的无偏估计。由于具有实时性强、存储量小、估计性能佳、突破了模型上常系数和单维输入输出的限制等特点,卡尔曼滤波作为最重要的最优估计理论,在工程中得到了广泛的应用,特别是在综合导航系统中应用卡尔曼滤波对各种导航数据进行综合处理,可以有效地提高系统的精度,克服单个导航设备的不足。卡尔曼滤波算法详见有关参考文献。

(2) 应用卡尔曼滤波时的一些技术处理方法。

1) 连续的状态方程、离散的测量方程。经常遇到的一种情况是,系统的状态方程是连续的,即一阶微分方程组的形式,而采集得到的测量值是离散的,因而测量方程是离散形式的。这时一般的处理方法是将连续的系统状态方程离散化,用离散的卡尔曼滤波方程估计系统的状态。

2) 有色噪声的白化。实际工程问题中,系统噪声和测量噪声一般都是有色噪声,如惯性导航系统中,陀螺随机漂移是系统的一种噪声,它可看成是一阶马尔可夫过程

$$\dot{\epsilon} = -\frac{1}{\tau}\epsilon + \omega \quad (7.4-25)$$

式中: ϵ 为陀螺随机漂移量; τ 为相关时间; ω 为白噪声。

此时,可用状态扩维法将陀螺随机漂移量 ϵ 看成是系统的一个状态,将上述方程并入整个系统的状态方程,这样系统噪声就是白噪声了。

3) 卡尔曼滤波发散的抑制。在滤波计算过程中,有时会出现估计误差越来越大的情况,这种现象就是滤波器的发散。其主要原因有两种:①滤波模型和噪声的统计特性不准确;②在递推过程中,随着步数的增加,计算误差逐步积累,导致发散。通常需要采用以下方法来预防滤波发散:衰减记忆滤波、限定记忆滤波、平方根滤波、限定滤波增益最小值、自适应滤波等。具体方法参见有关资料。

4) 降阶次优滤波。在实际工程问题中,系统模型及噪声模型有时很难精确得到,简化滤波模型、降低系统阶数,反而是有利的。此时应注意在滤波模型中加大系统噪声强度值,弥补系统模型误差对滤波稳定性的影响。

6.3.5 电子海图显示与信息系统

电子海图显示与信息系统(Electronic Chart Display In-

formation System, ECDIS)是一种能够同时显示海图信息和导航信息的助航设备,在一些技术先进的国家,如日本、美国,已经有了几代电子海图产品,特别是日本,大多数渔船和商船都装备了复杂程度不同的电子海图设备;加拿大、英国、法国、德国、荷兰、挪威、澳大利亚、丹麦、俄罗斯等国家都在积极研制各种电子海图系统。

(1) 电子海图显示与信息系统的结构。电子海图显示与信息系统是一种把各种传感器综合成体的综合安全导航系统的输出终端。它把雷达原始视频信号经过雷达接口电路的模/数转换成数字信号送给处理机;将 ARPA 输出的数字信号解码送计算机;将 GPS 信号送计算机。使雷达图像、ARPA 和 GPS 船位信号与电子海图的信息重叠显示。电子海图系统主要由两部分组成:

1) 电子海图信息数据库:电子海图信息数据库以数字的形式处理和存储各国水道测量部门提供的海图数据信息,它包括全面完整的海图信息和航海相关信息,它可以用计算机软件形式和一定的传输方法及格式由各船舶和陆上的电子海图数据库分库传递、修改和更新资料信息。

2) 电子海图显示系统:电子海图显示系统由电子船用海图(electronic navigational chart)软件和电子海图显示设备配件(electronic chart display equipment)组成。具体包括主控计算机、高分辨率彩色显示器、图形显示控制板、语言板、鼠标、功能键盘及相应的对外接口装置。

(2) 电子海图显示与信息系统功能要求。

1) 定位。接收 GPS 或罗兰 C 数据,结合其他传感器数据进行滤波处理,得出最佳船位。

2) 海图作业。可完成在纸质海图上的全部作业,如拟定计划航线、标绘航迹、图上量算、导航计算等;并能对图上要素定时进行检查,以防触礁和搁浅。

3) 航路监测。检查当前位置与预定位置的匹配情况,给出修正方案,使船舶按预定航线航行。

4) 综合显示。显示内容有海图、航迹、雷达目标以及各种导航数据、避碰最佳方案、各种汉字提示等。显示方式可分多层、多窗口、多比例尺等。

5) 雷达信息叠加处理。实时接收雷达的二次信息,并与海图信息叠加后显示,起到避碰和定位作用。

6) 传感器处理。可处理定位仪、测深仪、气象仪、陀螺罗经、计程仪等多种航海设备的信息以及风、流、潮汐等资料。

7) 记录和回放。能记录所有的导航信息和船舶处理参数以及有关海图显示、航迹、人一机对话的信息。这些数据可以保存 12 h 以上。一旦发生事故,可将这些数据重现在屏幕上,以供有关人员分析。

8) 告警。当船舶航行偏离计划航线、驶入有特殊情况的海域、发现危险目标以及系统发生故障时,能够以语言、图形、文字等形式告警。

9) 海图修改。根据航海通告或无线电联网数据,更新电子海图数据,而不破坏原始数据。

(3) 电子海图显示与信息系统的性能要求。

1) 自动化程度要高。它可与综合导航系统、避碰系统、通信系统相结合,形成一个新型的综合系统,其功能如计划航线的制定、航路监视、自动完成海图作业、自动记录数据等,远远超过纸质海图所具有的功能,极大地提高了自动化程度。

2) 能改善和保障航海的安全性。它不仅能精确地显示船位,也能显示计划航线和实时航迹以及周围环境的水文地

理特征,并可按预定航线搜索潜在的危险因素,特别是能把雷达信息叠加到海图上,从而使航海人员能迅速判断并做出避碰的决策。如果配合使用航海专家系统,不仅能减轻航海人员的负担,还能使航海的安全导航和精确导航有可靠的技术保障。

3) 能极大地减轻航海人员的压力和工作负担。由于能自动完成海图标绘和航海作业等功能,航海人员只需把注意力放在避碰和对自动告警的处理上,因而极大地减少了由于人为错误判断而造成的事故损失。

4) 能大大扩展海图显示的范围。它不仅能显示纸质海图的全部信息,也可以显示航行告警提示、人一机对话内容,必要时还可以显示海图的附加资料、航海手册、航路指南等信息。

5) 能任意选择海图显示的区域。用户可以任意选择显示的海区,而且可以任意移动和漫游,可以放大和缩小等。

6) 能任意选择海图显示的内容。电子海图可分层、分级显示,用户可选择显示的层次,也可决定是否要与雷达信息叠加。

7) 能提高海图显示的识别性。它可通过彩色的动态图形,提高静止显示的识别性;利用闪烁等显示特性,提高目标显示的识别性。

8) 海图容易修改。它可以通过计算机编制的程序来进行修改,简单易行。

9) 电子海图具有容量大、携带方便、长期使用、收藏方便等特点。

6.4 典型产品介绍及指标

6.4.1 大型水面舰船综合导航系统

(1) 系统组成。大型水面舰船综合导航系统组成框图如图 7.4-37 所示。



图 7.4-37 大型水面舰船综合导航系统组成框图

(2) 主要功能。

- 1) 提供本舰(艇)的运动姿态基准—航向角、纵摇和横摇角、绝对和相对航速。
- 2) 提供本舰(艇)的舰位—经度、纬度、格林时。
- 3) 制定航行计划,进行航行参数的实时解算。
- 4) 提供海图作业和自动标绘海图。
- 5) 提供航海图形显示、操作和计算功能。
- 6) 具有综合导航系统各设备之间优势互补、资源共享的组合能力。

(3) 主要性能。

- 1) 航向精度: $\leq 6'$ 或 $\leq 4' \cos \phi$ (RMS)。
- 2) 水平精度: 纵摇、横摇 $\leq 2'$ (RMS)。

3) 航速精度: $\leq \pm 0.15 \text{ n mile}$ 。

4) 定位精度: 罗兰 C: $0.2 \sim 1.2 \text{ n mile}$ 。

GPS: 22 m 。

GLONASS: 20 m 。

北斗: 20 m 。

GPS/GLONASS 组合定位: 16 m 。

罗经/计程仪推算舰位: 0.5 n mile/h 。

综合导航系统定位: 优于单一组合方式的定位精度。

(4) 系统接口。

1) 内部接口。

a. EIA-RS-422A 标准串行数字接口: 综合导航系统输入的内部有关设备有 GPS/GLONASS/北斗、罗兰 C、平台罗经数字发送箱、电磁计程仪、船舶气象仪、回声测深仪等。

综合导航系统输出的内部有关设备: 航迹绘图仪、电子海图显示与信息系统、自动操舵仪、平台罗经、战斗航海作业标绘装置及遥显装置。

另外还有各独立的导航设备之间的信息接口,如平台罗经、计程仪、船舶气象仪等。

b. 并行数字接口: 平台罗经同信息发送装置和数字发送装置之间的接口。

c. 模拟量接口: 平台罗经、电控罗经和电磁计程仪提供模拟量接口:

转值 $360^\circ/\text{r}$ 、 $10^\circ/\text{r}$ 、励磁电压 $115 \text{ V } 400 \text{ Hz}$ 。

转值 $1^\circ/\text{r}$ 、励磁电压 $110 \text{ V } 50 \text{ Hz}$ 。

转值 55 kn mile/r 、励磁电压 $110 \text{ V } 50 \text{ Hz}$ 。

d. 射频信号接口: 导航天线耦合器到罗兰 C 接收机、气象传真机的同轴射频信号接口。GPS/GLONASS/北斗天线到 GPS/GLONASS/北斗接收机的同轴射频信号接口。

2) 外部接口。

a. 双冗余交换式以太网接口: 有网络广播发送的通信与指定节点的网络通信两种方式。

更新速率: 以 40 次/s 的速率传输舰艇航向角、纵摇角和横摇角信息,以 1 次/s 的速率传输舰艇位置、航速、气象和水深信息。

b. RS-422A 标准串行接口: 综合导航系统至消磁设备综合监视设备和电子战系统; GPS/GLONASS 兼容接收机到时统设备的时码信息和船舶气象仪到导弹指挥仪之间信息。

c. 脉冲电路接口: 电磁计程仪到导航雷达、避碰雷达、减摇装置和 GPS/GLONASS 兼容接收机到时统设备的秒时标脉冲。

d. 模拟量接口: 综合导航系统对外的点对点的信息输出均采用标准的模拟量接口。如平台罗经发送装置,电磁计程仪航速航程发送装置,平台罗经与电控罗经采用的航向转换装置等对外发送信息时可采用模拟量接口。

6.4.2 常规动力潜艇综合导航系统

(1) 系统组成。综合导航系统组成如图 7.4-38 所示,用于核动力潜艇的综合导航系统,在此用惯性导航系统来替代平台罗经即可,并附加静电陀螺监控器或其他辅助装置。

(2) 系统功能。

1) 利用综合导航系统的处理机,将推算艇位数据进行优化处理。

2) 提供航向、水平、海区深度下潜深度、海况等信息。

3) 根据不同的组合模式,利用 GPS、潜望镜、自动导

航仪等设备信息进行实时舰位校正。

- 4) 利用平台罗经的短期惯导功能, 可以获得绝对速度。
- 5) 导航数据的综合显示。
- 6) 航海辅助计算和自动海图作业。
- 7) 可利用通信系统天线进行导航定位。

(3) 系统性能。

1) 航向精度: 匀速直航 $\leq \times'$, 机动航行 $\leq \times'$ 。

短期惯导状态方位漂移 $\leq \times'/h$ 。

2) 水平精度: $\leq \times'$ (RMS)。

3) 航速精度: 相对海水速度 $\leq \pm 0. \times n$ mile;
相对大地速度 $\leq \pm \times. \times n$ mile。

4) 定位精度:

水下自动式推算航位: $(\times n$ mile/h (CEP)。

短期惯导状态: $< \times n$ mile/h (CEP)。

GPS: $< 22m$ (RMS)。

自动导航仪: $\leq 0. \times \sim \times n$ mile (RMS)。

综合定位数据处理优化率: $\times \times \%$ 以上。

5) 测深、测潜精度:

测深: 在深度 h 为 $0 \sim 100m$ 时, 精度为 $0.1 \sim 0.4m$ 。

h 为 $100 \sim 1000m$ 时, 精度为 $(0.6\% \sim 0.8\%) h$ 。

h 为 $1000 \sim 2000m$ 时, 精度 $< 1\%h$ 。

测潜: 在深度 h 为 $0 \sim 50m$ 时, 精度为 $\pm (0.4\%h \sim 0.1m)$ 。

h 为 $600 \sim 300m$ 时, 精度 $< 1\%h$ 。

6) 使用范围: 经度: 南北 $0^\circ \sim 70^\circ$, 纬度不限;

航速: $-4n$ mile $\sim +500n$ mile。



图 7.4-38 常规动力潜艇综合导航系统组成框图

(4) 设计特点。

1) 系统成功地解决了多种信息输出、输入的电磁干扰问题, 实现了全系统近百种信息的集中管理。

2) 推广了卡尔曼滤波器算法实时性, 使导航信息达到了综合优化的目的, 优化率均达到 20% 以上。

3) 研制的容错软件实时性强, 可靠性高, 可维修性好, 易于扩充, 具有完善的故障诊断和处理能力、监控能力, 达到了各种工况下工作模式的自动转换。

4) 解决潜艇导航天线共用技术难题, 完成一根导航天线与多种导航设备共用和导航天线与通信天线的共用要求。

5) 系统采用分布式数据总线技术, 从根本上解决了集成化与瓶颈效应的矛盾, 保证系统能长期可靠的工作。

6) 解决了平台罗经和自动寻星天文定位系统在艇的安装精度和互相对准问题。

7) 建立了一套与实艇运行工况逼真的测试系统和试验环境, 确保系统的良好环境适应性。

6.4.3 美国的 WISDOM 综合导航系统

WISDOM 综合导航系统是美国利顿公司 1988 年对 1976 研制的 WINS 综合导航系统的改进型, 该系统的框图如图 7.4-39 所示。

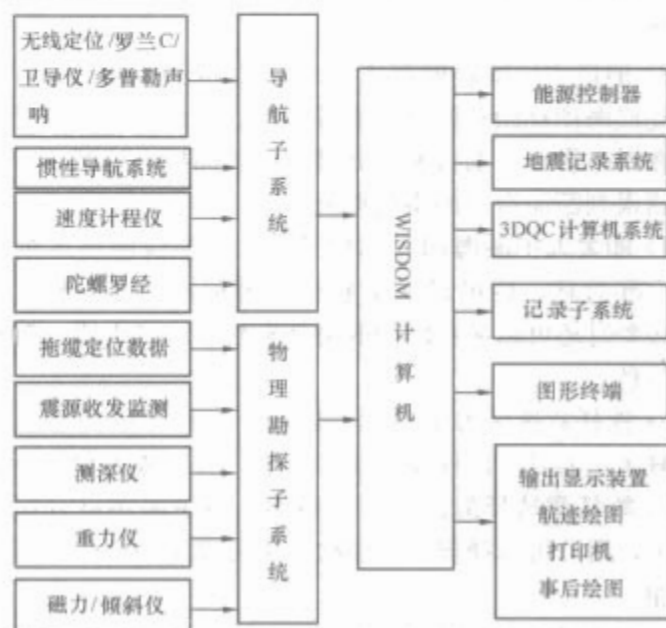


图 7.4-39 WISDOM 综合导航系统框图

WISDOM 综合导航系统是一种用于海洋地球物理勘探船的高精度的综合导航系统。

6.4.3.1 系统的配套与主要功能

WISDOM 是由以下三个子系统构成: 组合导航子系统、WISDOM 计算机子系统、物理勘探子系统。

WISDOM 主要用于解决海上石油勘探, 其功性除了导航系统之外, 很大部分是用于地球物理勘探数据的综合处理。该系统配置完整, 具有下述特点:

(1) 具有广泛的定位适应性。导航子系统具有接收多种导航传感器信号的能力, 并采用组合软件优化设计。

(2) 具有精确的放炮控制。位置数据用于能源操纵器和地震数据记录系统。

(3) 三维测量控制。3D-QC 计算机系统为三维数据的收集控制、检测提供了有用的工具, 可计算、显示、存储每次放炮后测量域中点的数据, 使船舶在离开探测区之前完成了完整的三维测量震区覆盖。

(4) 具有综合数据采样记录和可实现两船同时作业。

对于组合导航子系统, 其主要的功能有:

1) 具有高精度的实时定位能力, 系统设计指标为 $1m$, 目前实际可达到 $10m$ 左右。

2) 系统最终解决地震测点上的位置测量, 获得精确的测量中点位置, 从而确定断层位置 (测量船拖缆为 $300m$, 电缆上每 $13m$ 有一个传感器, 船上震源放炮的反射回波由电缆上传感器接收, 并修正漂流后确定其位置)。

3) 具有实地船速测量和海流修正, 提供测量作业航迹控制。

6.4.3.2 组合导航子系统

导航子系统由多种传感器和接口组成, 向 WISDOM 计算机输入数据进行组合导航数据处理。

(1) 无线电定位。高精度无线电定位系统可作为本系统的定位手段, 系统能容纳 16 种类型的无线电定位输入, 所有 16 种定位输入以两秒间隔记录存储, 滤波值以十秒间隔记录存储并进行信息处理。

(2) 罗兰 C。罗兰 C 接收机。

(3) 卫导仪。配备双通道子午仪导航仪 (MX1107RP)

和美乐华公司的 T-SetIGPS 导航仪。

(4) 多普勒声纳。多普勒声纳实现三维测量。船上配置四个声纳基阵, 工作水深为 400m。与此相关的设备有。一台陀螺罗经、两套用于补偿多普勒声纳误差。

(5) 地球科学数据装置。该装置把信号转换为 16bit 合适格式输入到 WISDOM 计算机, 速率为 100μs。系统用于双船工作时, 试装置以无线电通信工作方式同遥控地震测量船组成链网, 使 WISDOM 计算机接纳遥控船的导航数据, 并控制遥控船放炮。

系统计算机为 P-1000 小型计算机, 具有 RS-232 标准接口, 导航软件包括了对速度、位置优化处理的卡尔曼滤波软件, 数据更新率为 0.1s, 滤波周期为 15s。

6.5 注意事项

6.5.1 环境适应性

(1) 船舶综合导航系统的环境条件(如气温、湿度、淋雨、太阳辐射、雪、冰、闪电、霉菌、盐雾、倾斜、摇摆和振动、冲击、颠簸、浸渍、噪声等)的适应性应符合各国规定的军用标准或舰船顶用规范。

(2) 综合导航系统根据装船舶(舰艇)的对象的不同, 系统所处的环境条件也有所不同, 因而参与综合的有关导航设备的环境适应性, 还应符合各船舶(舰艇)总体所规定的船舶(舰艇)用条件。

(3) 电磁环境的有关要求应符合各国相关标准, 如搭接与接地、电磁干扰控制等的要求。

6.5.2 数据处理方法要求

综合导航系统输出信息的精度, 除了与选择设备的精度差异有关之外, 更重要地源于该系统对输入信息的综合处理方法。根据船舶(舰艇)总体导航定位和作战系统对系统精度的要求, 运用费效比分析采用不同的数据处理技术, 设计出最佳滤波器, 来抑制测量信号中的随机噪声的干扰。目前, 国内外一些综合导航系统采用的主要处理技术有以下几种:

(1) 数字低通滤波技术。利用简单滤波技术获得精确的校正信息的校正—推算系统。罗兰 C 定位含有高频误差, 而推算系统含有低频误差, 采用数字低通滤波器, 则可获得畸变很小的校正位置, 并以此校正推算系统, 使其定位精度提高, 限制了推算系统的误差增加。

(2) 最小加权二乘法。对于每一个独立的定位设备的输出信息经过适当地滤波之后进入推算系统, 再根据各设备特性, 对每个输入分别给予合理的加权。该方法对于估算推算系统的随机误差和位置误差是有效的, 技术上比较成熟, 工程上已广泛应用。

(3) 卡尔曼滤波技术。将多种导航设备组成各组最佳的工作模式, 利用卡尔曼滤波技术处理多种测量数据, 采用最优控制方法, 为系统状态提供最佳的估计, 达到极大地抑制系统随机误差的影响。该技术已被国内外先进的综合导航系统应用。如美国的新型导弹核潜艇、靶场测量船、导弹驱逐舰等。

6.5.3 接口、参数要求

综合导航系统的内部接口指参与综合导航系统的设备与综合导航显控台(或控制器)之间的信息接口。输出接口指综合导航显控台与各用户的设备系统(或数据总线)、船舶导航定位终端设备(电子海图、航迹自绘仪、避碰雷达等)的接口, 以及有关导航设备与作战系统的点对点接口。各类船舶综合导航系统对外输出信息形式参数都大致相同, 均按

有关标准接口设计的统一要求进行。

(1) 接口信息的种类有艏向角、纵摇角、横摇角、相对速度、绝对速度、船位(经、纬度)、气象、水文及时间等信息。接口的形式包括数字量接口(总线及标准串、并行接口)和模拟量接口。

(2) 数字量接口包括 RS-422A 通信接口、网络信息接口、1553B 总线接口等, 都应符合相关技术标准的要求。用数字量传输的信息有艏向角、纵摇角、横摇角、经度、纬度、绝对速度、相对速度、升沉速度、流速、流向、风速、风向、海深、温度、湿度、时间、潜深、艇下潜深度、声速梯度等。

(3) 模拟量接口包括同步机输出接口、旋转变压器输出接口。

6.5.4 输出数据的传输要求

综合导航系统对外输出数据的传输方式, 视各型船舶(舰艇)设备系统的计算机结构形式和网络结构而决定, 一般均可以单址、双址和广播方式传输导航定位、姿态和速度等信息。

(1) 大中型船舶。应适应船舶设备系统采用的网络体系结构的需求, 在实时多任务操作系统软件平台上, 完成网络总线的接口技术。从姿态基准信息源起, 到综合导航系统节点的网络总线接口均采用双冗余配置。

在网络上设置综合导航信息监测功能, 以实时监测综合导航系统信息网络通道的工作状态; 网络通道可相互检测和自动切换, 保障信息传输安全、可靠。

综合导航系统信息发送和网络总线接口装置按分布式配置, 即: 综合导航系统作为第一节点, 按正常速率(1次/s)向网络总线发送综合导航系统信息; 数字发送装置作为综合导航系统第二节点, 按高速率(60次/s)向网络总线发送姿态信息。综合导航系统还可向网络发送数字海图信息。

综合导航系统还可以点对点的方式, 按照标准的接口协议向有关用户传输数/模量导航信息。

(2) 常规动力潜艇。综合导航系统主控计算机采用分布式总线技术, 使其与各导航设备、指控系统、雷达、通信系统间进行信息传输, 且采用串行接口数据总线 RS-422A 和电流环, 实现各处理机之间的信息交换。

采用 Multibus 多总线、集中式仲裁策略, 当任何一个处理机使用总线时, 必须发出请求信号, 只有当总线信号 Busy 信号处于高电平时, 请求使用总线的主模块方可得到总线的控制, 因此解决输出信息的瓶颈效应。

根据输出信息精度和可靠性要求, 将信号源划分为不同优先等级和不同的组合模式, 通过诊断软件, 对系统信息进行备份与自动切换。

为确保作战系统信息传输的需要, 硬件结构上的电子开关可由软件对信息判测进行控制, 在系统掉电和恢复正常供电时, 实现系统对外信息畅通。

7 无线电告警

7.1 无线电航行警告系统

无线电航行警告系统(radio navigational warning)和航行通告是将有关海区和水域内发生的或将要发生的, 可能影响航行和作业安全的任何情况变化, 及时准确地通知所有船舶, 使之采取适当措施或保持戒备, 以确保船舶航行和作业安全。各国海上安全主管部门专设的海岸电台用无线电发布

这类公告称为无线电航行警告。1977年国际海事组织(IMO)正式建立了世界无线电航行警告系统。该系统将全球分成16个播发航行警告的区域,到1980年,16个区已全部投入工作。中国沿海划在第XI区。每个区域由一个国家作为协调人,负责将搜集到的资料进行核对、整理和编辑,再播整个区域的航行警告。

航行警告的内容必须是航海通告未发布过的新情报,包括主航道上航标损坏,危及航行的新的沉船,助航设施的重要改变,导航设施严重故障,航行水域中正进行的工程作业,在航行水域中正在进行的有碍其他船舶通行的大型拖带运输,航道中新发现的滩险,以及有碍航行安全的其他正在进行的活动等。航行警告分为3类:区域警告,由航行警告区协调人播发整个辖区的远程航行警告;沿海警告,每个沿海国家的协调人播发本国沿海和临近沿海水域的航行警告并迅速传送给所在区的协调人;地方警告,由港湾当局向辖区播发,作为沿海警告的补充。

7.2 中国航行警告系统

中华人民共和国港务监督局是联合国政府间海事协商组织(IMCO)有关“世界性航行警告事务”所建立的第十一航行警告区的中国国家协调人。中华人民共和国港务监督局设航行警告总台(以下简称总台),天津、上海、黄浦港务监督设航行警告分台,其他各港务监督设航行警告台。

(1) 航行警告总台的职责。

- 1) 管理我国民用无线电航行警告的发布。
- 2) 与第十一航行警告区建立联系,审定和传递有关的“区域警告”资料和其他有关资料。
- 3) 监督第十一航行警告区工作的执行。
- 4) 审核涉及区域范围的“沿海警告”。

(2) 航行警告分台的职责。

- 1) 审定和发布下列范围的“沿海警告”:
天津港务监督航行警告分台:北纬 35° 以北我国沿海水域。
上海港务监督航行警告分台:北纬 23.5° 至北纬 35° 我国沿海水域。
黄浦港务监督航行警告分台:北纬 23.5° 以南我国沿海水域。

- 2) 发布本港辖区的“地方警告”和港区书面航行通告。
- 3) 将接到的“区域警告”资料报送总台。
- 4) 汇集本海区发布的无线电航行警告,定期刊发书面通告。

(3) 航行警告台的职责。

- 1) 发布本港辖区的“地方警告”和港区书面航行通告。
- 2) 将需要发布“沿海警告”或“区域警告”的资料按警告格式拟稿或直接转送分台。
- 3) 发布本港辖区附近的沿海紧急警告。
- 4) 无线电航行警告的申请发布。
1) 凡经批准在港口辖区内进行工程和作业施工单位应在预定工作日期的7天前向当地港务监督航行警告台(分台)提出发布无线电航行警告(或港区书面航行通告)的书面申请,在警告(或通告)发布后方可作业。
2) 凡经批准在海上进行属于本章所列工程或作业施工单位应在预定工作日期的10天前向就近港务监督航行警告台(或分台)提出发布无线电航行警告的书面申请,在警告发布后方可作业。
3) 凡在港内或海上进行紧急救助、打捞等申请发布无

线航行警告的手续可适当简化,申请时不受上述规定限制。

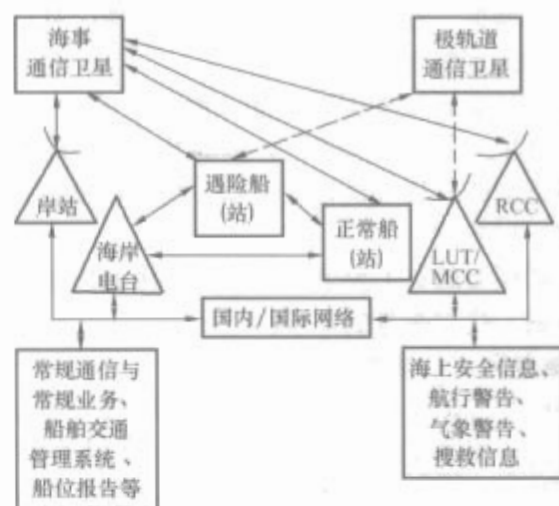
为保证远洋船舶能掌握近海及港区情况,船舶可电询各港各监督航行警告台,即能及时、准确地得到有效的航行警告。

船舶服务员必须按时收听航行警告,如玩忽职守而造成重大事故者,将受到处罚直到追究刑事责任。

7.3 GMDSS 在中国的发展及应用

7.3.1 GMDSS 的构成及工作原理

全球海上遇险与安全系统(GMDSS)是国际海事组织(IMO)利用现代化的通信技术改善海上遇险与安全通信,建立新的海上搜救通信程序,并用来进一步完善现行常规海上通信的一套庞大的综合的全球性的通信搜救网络。该系统主要由卫星通信系统——INMARSAT(海事卫星通信系统)和COSPAS/SARSAT(极轨道卫星搜救系统)、地面无线电通信系统(即海岸电台)以及海上安全信息播发系统三大部分构成,如图7.4-40所示。



注:RCC为搜救协调中心;LUT为极轨道搜救卫星本地用户终端;
MCC为极轨道搜救卫星任务控制中心。

图 7.4-40 GMDSS 的构成图

(1) 卫星通信系统。

- 1) INMARSAT。INMARSAT 主要由海事通信卫星、移动终端(船舶地球站)、海岸地球站以及协调控制站构成。
- 2) COSPAS/SARSAT。COSPAS/SARSAT 是由加拿大、法国、美国和前苏联联合开发的全球性卫星搜救系统,由示位信标、空间段(极轨道通信卫星)和地面部分3个分系统组成。

(2) 地面无线电通信系统。地面无线电通信系统用于遇险报警、搜救协调通信、搜救现场通信及日常公众通信,主要由MF/HF/VHF通信分系统组成。

(3) 海上安全信息播发系统。海上安全信息播发系统由岸基NAVTEX系统及INMARSAT系统中的增强群呼系统(EGC)、船舶交通管理系统(VTS)等组成。

7.3.2 GMDSS 的功能

GMDSS具有以下七大功能:

- 1) 遇险报警。遇险者迅速并成功地把遇险事件提供给可能予以救助的单位。报警包括船对岸、船对船和岸对船报警3个方向,其中船对岸报警是主要的。
 - 2) 搜救协调通信。RCC通过岸台或岸站与遇险船舶和参与救助的船舶、飞机以及与陆上其他有关搜救中心进行有关搜救的直接通信。
- 搜救协调通信是双方进行有关遇险与安全内容的信息交换,即具备双向的通信功能,与报警功能中只具有向某一方

向传输特定信息不同。

3) 救助现场通信: 在救助现场参与救助的船舶之间、船舶与飞机之间的相互通信称为现场通信。它包括救助指挥船与其他船、船与救生艇、指挥船与救助飞机之间的现场通信。通常, 这种通信的距离比较近。

4) 定位: 遇险船舶和救生艇所发出的一种无线电信号, 便于救助船舶和飞机去寻找遇难的船舶和救生艇。

5) 海上安全信息的播发: 本系统能够提供各种手段发布航行警告、气象预报和其他各种紧急信息, 以保证航行安全。

6) 常规的公众业务通信: GMDSS 系统要求船舶配备的通信设备不但能进行遇险、紧急和安全通信外, 还能进行有关的公众业务通信。也就是船舶与岸上管理部门之间进行管理、调度等方面的通信以及船舶与船东、用户等通信。

7) 驾驶台对驾驶台的通信: 驾驶台之间的通信是有关航行安全等避让信息的传递, 属于 VTS 方面的通信, 这种通信在狭长的水道和繁忙航道航行中是非常重要的。

8 普通导航设备

8.1 基础知识

1) 导航元素。与航行体的引导和定位有关的最基本数据。

2) 航迹。空间航行中, 航行体重心在空间运动的轨迹以及舰船在海上航行运动的轨迹。

3) 航线。空间航行体的航迹在地面的投影成为航线, 对于舰船而言, 航迹即航线。

4) 磁航向。飞机(或舰船)的磁北向 ON 与其纵轴向之间顺时针方向的夹角成为飞机或者舰船的磁航向。

5) 航向角。航行体中轴线与航行体和某一地标点(一般为导航台)的连线之间夹角的水平投影。

6) 航迹角。地速方向与正北方向之间的夹角。

7) 真航向。舰船的北向与其纵轴向之间顺时针方向的夹角。

8.2 磁罗经

(1) 地磁导航。地磁场的方向和量值均可用于导航。磁罗盘就是利用地磁场的方向来指示磁北方向(磁北向与北向的偏差称为磁差)。这是一种古老而简单、应用广泛的测向方法。测量地磁场的量值, 可利用等磁力位置来得到位置线, 但由于磁场强度与高度及地理位置有关, 它随时间缓慢变化, 且易受磁暴的干扰, 故实际应用较少。

(2) 地磁仪。用于测量地磁场强度和方向的仪器的统称。

(3) 磁罗经。磁罗经用来指示舰艇航向, 并可与方位圈相配合测量目标方位和舷角。目前, 许多大中型舰艇除了安装性能优越的陀螺罗经外, 均还安装有磁罗经, 其原因在于磁罗经具有构造简单、生命力强、维护保养简便、不使用电源, 随时可用等优点, 自古以来在航海事业上一直起着重要作用。当今舰船以陀螺罗经为主要指向仪器, 磁罗经可与它取长补短, 互相参照。磁罗经是由指南针改进而制成的。

(4) 地球磁场。地球磁场的强度用 T 表示。在磁罗经原理学中, 磁场强度习惯上称为磁力, 所以 T 就称为地磁力。磁针之所以能在地球上指示方向, 就是受地磁力 T 的作用。地磁力 T 的大小和方向在地球上各处是不同的, T 的方向就是磁力线的切线方向, 所以磁针指向磁力线的切线方向。

T 与水平面之间的夹角, 称为地磁倾角, 用 θ 表示。 θ 为零处, 称为磁赤道; θ 为 $\pm 90^\circ$ 处, 称为地磁北极和地磁南极。为了便于分析, 把地磁力 T 分解为水平力 H 和垂直力 Z 。

地磁水平力 H 在水平磁北方向, 其使磁针水平指北, 称为磁北力。由图 7.4-41 可以看出, 磁北力在磁赤道处最强, 随着纬度的增加而逐渐减弱, 到达磁南北极处为零。所以舰艇航行到高纬度海区时磁罗经指向能力变弱, 准确性较差, 在地磁极附近磁罗经不能正常工作。

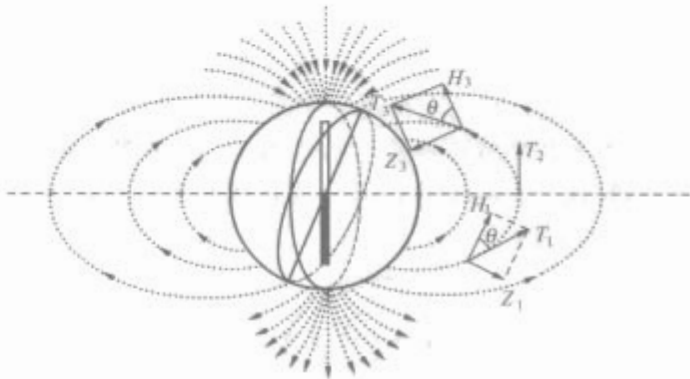


图 7.4-41 地球磁场

(5) 磁差。地球的磁北 (Nm) 与真北 (N) 不在同一方向, 磁北与真北之间的夹角称为磁差 (Var)。磁北偏东磁差为正, 偏西磁差为负, 如图 7.4-42 所示。由于磁罗经只能指示磁北方向, 因此在实际使用时要进行磁差修正。磁差因时因地而异, 各地磁差值及其年变化量, 在海图上都有标注。

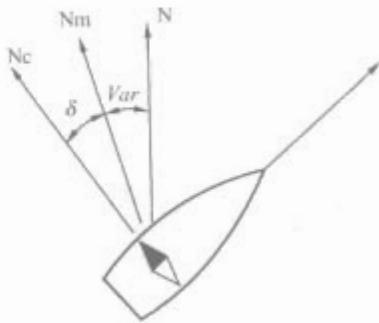


图 7.4-42 磁差

(6) 罗经盆。罗经盆中, 起指向作用的是罗经盘, 简称罗盘。它由磁棒、刻度盘和浮室构成, 在轴针的支撑下可以自由转动。刻度盘固定在浮室上面, 刻有 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的刻度。罗盘的下部, 焊有对称平行排列的磁铁棒, 其轴线方向与刻度盘方向一致。浮室是一个半球形的空气盒, 浸在液体中会产生浮力, 以减轻罗盘在轴针上的压力。浮室中央有防震的宝石轴承装置, 称为轴帽, 轴针就顶在这里, 如图 7.4-43 所示。这样的结构使罗盘在轴针尖上转动时的摩擦力极小。

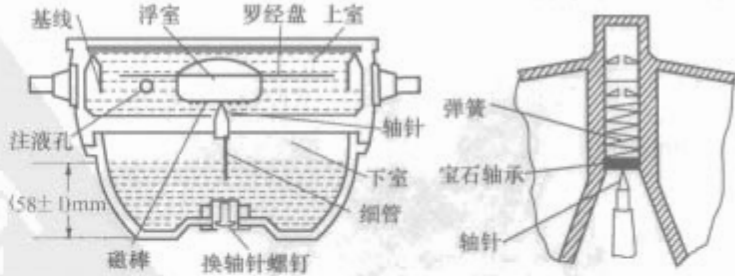


图 7.4-43 罗经盆

(7) 方位圈。方位圈套在罗经盆上, 用来观测目标的方位和舷角。方位圈上装有前后瞄准器。前瞄准器下部有一棱镜, 通过它可以看到罗盘的刻度。在前瞄准器上, 还有一块黑色玻璃片, 供测定天体的方位用, 如图 7.4-44 所示。

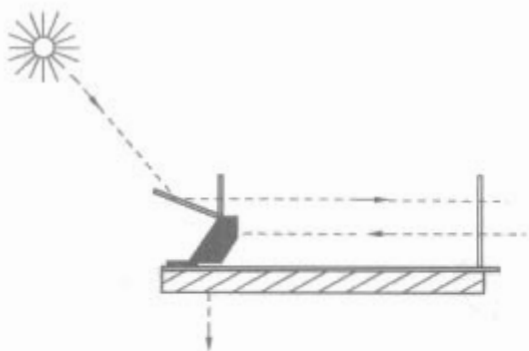


图 7.4-44 方位图

(8) 罗经座。罗经座有两个作用：①放置罗经盆，使罗经盆通过水平环和减震弹簧与船体相连；②放置消除自差用的磁铁和软铁。罗经座的各部分都是用非磁性材料制成的，如图 7.4-45 所示。

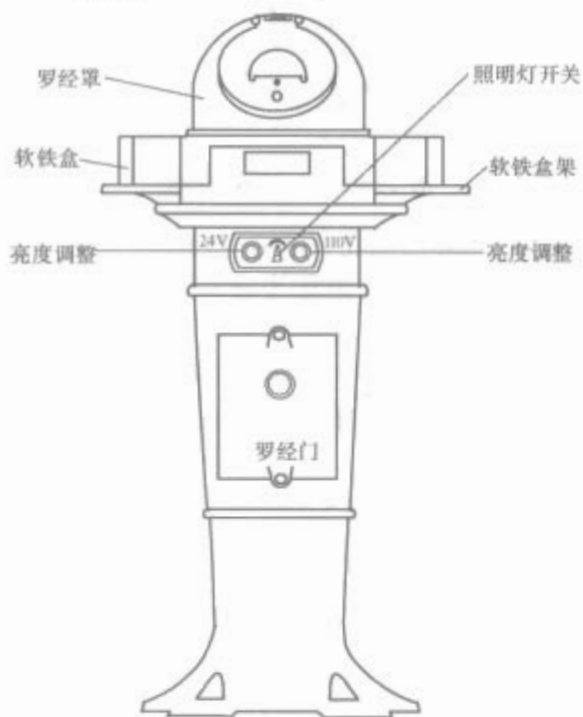


图 7.4-45 罗经座

8.3 六分仪

一种手持的轻便仪器，由分度弧、指标臂、动镜、定镜、望远镜和测微轮组成，适用于船上观测天体高度和目标的水平角与垂直角的手持仪器。它可以测量天体的高度角和水平角，将所得结果与天文台编制的星表对照，就可以测定船舶所在地的当地时间。六分仪是精密的测角仪器，它由架体、光学系统和测角读数装置等三大部分组成，如图 7.4-46 所示。

光学系统包括望远镜、动镜、固定镜及滤光片；测角读数装置包括分度弧、指标杆、鼓形轮和游标尺。它们安装于

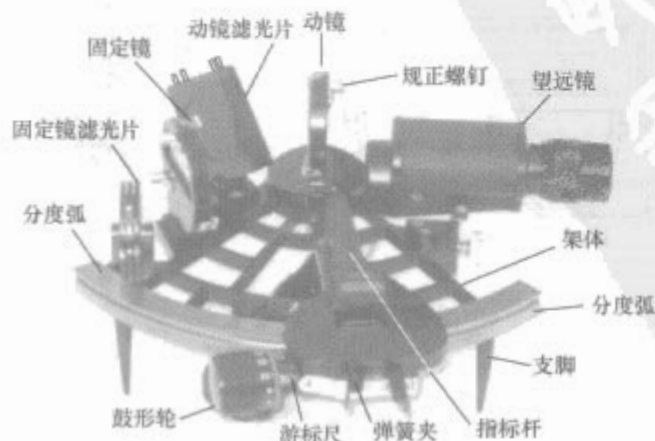


图 7.4-46 六分仪

架体上。六分仪指标杆将光学系统和测角读数装置组合成为一个整体。

8.4 其他导航方式

(1) 地标导航。利用目视、光学等方法，辨认与观测地面或者海上的特定标志（岛屿、灯塔、航标等），确定航行体所在的位置，以此来引导航行，称为地标导航。这是一种较为可靠而简便的导航方法，但易受气象条件和地区的限制。

(2) 灯光导航。利用灯光引导航行。在航空导航中主要用于夜间和白天能见度较低时的引导着陆。一般由进入灯、下滑航道线、跑道灯组成，用于指示跑道中心线、下滑航道线、跑道轮廓等。在航海导航中，灯光导航的应用极广泛，常用的有灯塔、灯桩、灯船、灯浮、环弧射灯和色光弧灯，它们可以用作引导和定位的标志、航道指示、障碍物及危险区域的指示等。

(3) 天文导航。利用天体导航定位的系统。天文定位在看不到陆地和岛屿的大洋中，利用观测天体的高度测定船位的一种方法。我国古代人民对天象的观测、天体的运行早就有详尽的记载，在汉代就有百余卷关于天文方面的书籍。人们将天上的星座位置和地上的位置相对应，有了天文定位的萌芽。先是由观星定向，进而发展到测量星体距水天线的高度测定船位。

(4) 水声定位系统。由水下声标、船上的声学接收、发射设备组成的定位系统。

(5) 船舶气象仪。船舶气象仪可测量风、温、湿、压等气象参数，并可自动接收航向、航速信息，能通过显示器自动显示气象参数，并向导航系统、武器系统直接传送气象参数。

(6) 无线气象传真机。无线气象传真机是军用气象资料接收设备。适用于常规潜艇、核潜艇、中大型水面舰只接受海浪、风力、气压、温度以及天气预报的图片和表格，还能提供气象变化的半色调卫星云图。

(7) 声速计。在海上测量声速的仪器。

(8) 海底声标。安置于海底的声学发射和接收的设备。

(9) 声学水位计。应用空气声学回声测距原理，根据声管传输的声信号测量水位变化的仪器。

(10) 水声应答器。即主动式水下声标，可接收船上声信号，并发射应答信号。

(11) 侧扫声纳。主动声纳与航向正交的固定声束对海底扫描，并记录出海底形状的一种声纳设备。

9 船舶通信系统

9.1 概述

9.1.1 船舶通信

船舶通信是采用通信装备和手段实施的船舶外部和内部通信。

随着无线电、电子领域高新技术的发展，船舶通信技术有了长足的进步，从早期的摩尔斯报发器到单边带电台、窄带直接印制电报终端直到海事卫星通信地球站；从中/短波段、超短波段到微波段；从地面通信到卫星通信，船舶通信进入了多种通信方式、多个通信频段、多种通信设备的时代。

9.1.2 海用通信频段的划分及其应用

海用通信系统的划分及应用示于表 7.4-4。

表 7.4-4 海用通信系统的划分及应用

频率范围	主要用途	特点	实际设计考虑
极低频 (ELF) 30~300Hz	对水下 潜艇通信	穿透海水能力强, 传播深度在 25~40m	岸上发射, 要较强功率和庞大天线。潜艇仅接收
甚低频、低频 (VLF、LF) 3~30kHz、 30~300kHz	对水下 潜艇通信	传播深度较差, 比起极低频通信条件差些	一般是岸上发射, 艇上接收。如艇上要发射, 需大功率发射机和携带拖曳浮标天线
中频、高频 (MF、HF) 0.3~3MHz、 3~30MHz	船对岸、岸对船、船对船通信	传播受电离层影响, 天线与频率匹配较难, 发射效率受天线系统及船结构影响	发射功率较高, 要设计良好的天线系统, 要考虑系统内外的电磁兼容性
甚高频、特高频 (VHF、UHF) 30~174MHz、 225~400MHz	船、船对空、岸对船、特高频卫星通信	视距通信, 天线系统要匹配, 发射功率较低	天线安装要高, 系统内外的电磁兼容性 & 天线方向性要良好设计
超高频 (SHF) 3~30GHz	卫星通信	穿透电离层直线传播, 天线有方向性, 可控, 窄波段	用抛物面天线, 直径在 0.5~2.1m, 安装位置受船体结构影响, 与其他电子设备的电磁兼容性要充分考虑
极高频 (EHF) 30~300GHz	卫星通信	直线传播, 天线方向性较强, 数据速率较低, 设备复杂、功率小, 带宽极宽	反向式天线, 覆盖半球需 2 部天线, 要考虑金属结构及其他影响

9.1.3 通信系统的分类

船舶综合通信系统由船舶需要使用的全部外部和内部通信设备和用户终端有机结合而成, 因此船舶综合通信系统可分为内部通信系统和外部通信系统。

(1) 内部通信系统。内部通信系统是保障船舶内指挥、会议电话、生活勤务、广播、报警等任务的通信系统。内部通信系统可由指挥电话分系统、自动电话分系统、声力电话分系统、广播分系统、场声指挥分系统、传话筒分系统和闭路电视与监视分系统的全部和一部分组成。

(2) 外部通信系统。外部通信系统是用于船舶之间或船舶与岸站之间进行通信的系统。外部通信系统可由甚低频收信分系统、高频发信分系统、高频收信分系统、甚/特高频通信分系统、数据传输分系统、卫星通信舰(艇)载站分系统、应急救生通信分系统、文电处理分系统和外部通信控制管理分系统等分系统的全部和一部分组成。

9.1.4 船舶通信系统的技术特征

(1) 船舶通信系统的特点。

①在同一船舶上使用的通信频谱宽, 因此所用的设备繁多, 且多种设备同时使用, 存在相互干扰; ②受船体空间所限, 各设备的天线安装条件受制约; ③船舶在海上航行时, 环境条件恶劣, 对设备的气候及机械条件要求高。

(2) 船舶通信系统的主要性能要求。

1) 工作频率范围: 见表 7.4-5。

表 7.4-5 工作频率范围

项目	频率范围
极低频 (SLF)	30~300Hz
甚低频 (VLF)	3~30kHz
低频 (LF)	30~200kHz
中频 (MF)	0.5~2MHz
高频 (HF)	发 1.6~30MHz, 收 0.15~30MHz
甚高频 (VHF)	30~174MHz
特高频 (UHF)	225~400MHz
超高频 (SHF)	卫星通信, 3.4~6.6GHz 或 10.7~14.5GHz
广播 (MF)	525~1605kHz
(FM)	88~108MHz
(HF)-	5~18MHz
电视 (VHF)	45~230MHz
(UHF)	470~890MHz

2) 通信距离要求。

①根据船舶航行范围确定通信距离, GMDSS 系统以通信系统使用各种频段无线电波覆盖的海域将全球划分为 A1~A4 航区, 由船舶的所航行的海区来决定船舶应配置的无线电设备; ②根据设备性能、天线系统效率计算通信距离。通信距离也即是船舶航行的通信系统所能覆盖的范围, 它与发射功率、天线系统效率及天线增益、传输路线噪声、接收机灵敏度和带宽、信噪比、使用的通信频率等参数有关; ③根据船舶续航能力估算通信距离。如果没有海上补给油、水, 理论上讲通信距离只需达到续航力的一半即可, 再加上一些特殊条件, 大约达到 $\frac{2}{3}$ 的续航力即可。但要考虑船舶在海上活动的特殊性, 通信设备要保证船舶应急情况, 所以要求通信距离为续航力的 1.2 倍。如果有海上补给, 则要求通信距离为续航力的 1.5 倍。

9.2 船舶通信系统的配备

(1) 通信系统的配备原则。船舶通信系统的配备根据任务和使用方要求有所不同。

通信设备数量和使用波段要保证通信网络及时、安全、正确开通; 满足网络同时使用条件下或是使用一部发信机时, 在设备配套时必须要有备用机器; 在设备选型配套时, 使配套设备尽可能减少。船舶之间设备配备在频段、工作方式、工作体制、终端设备等方面要相互匹配。

(2) 天线系统的选择。通信设备各自使用合适的天线, 应保证所有设备都能同时开通; 发信机可选用不同长度和类型的天线, 以提高发射效率; 尽量减少下划线数量。宽带天线要与所设计的船舶总体布置相匹配, 占用空间位置要小, 近场要尽量减少。

9.3 船舶通信信息传输方式及其选择

(1) 信息传输方式。根据 SOLAS 公约要求, 所有公约船已经完成了 GMDSS 通信设备的配备, 所使用的通信系统包括 INMASAT 卫星通信系统、地面中高频通信系统 (HF/MF) 和地面甚高频 (VHF) 通信系统。同时, 一些船舶因特殊通信需要及公司内部要求配备了 GNDSS 了 MARITEX 等, 完善的通信系统为船舶通信、船岸通信提供了多种可选的信息传输方式。

1) 电传通信。电传通信的特点是自动打印、传输速率较快、准确率较高, 目前可以提供船舶电传业务的设备包括 INMARSAT 船站、中高频 GMDSS 设备以及非 GMDSS 的 MARITEX。

2) 电话通信和传真。包括 VHF 和单边带无线电话 (SSB), VHF 是船舶必须配备的在避让及进出港航行时非常重要的通信手段。海上卫星通信业务一般通过 INMARSAT, 卫星通信不受时间、气候等外部条件的影响, 通信质量较高。

3) 数据传输。卫星通信提供的中高速数据传输业务用于处理图像、表格等容量大的信息。在一般的海事通信中较少使用。

4) 电子邮件。INMARSAT 种类岸站陆续开通了 E-mail 业务。

5) GSM 移动通信。对于沿岸航行的船只, 手机通信成为最方便有效的通信工具之一。

(2) 信息传输方式的选择。GMDSS 实施后, 船方可以选择多种方式进行通信, 在特定的条件下, 针对不同的目的, 选取哪种通信方式最佳, 适当的通信方式可以降低信息资费的同时达到最好的通信效果。电话、电传、传真、数据传输等各有利弊, 选择通信方式时应综合考虑通信效果、通信速率、资费、设备操作的方便性等因素。常规事务性通信经常选用电传或电话通信。

对于特定的通信方式, 选择通信首先要看船舶的配备情况, 在 A1、A2 海区航行的船舶, 如果没有配备卫星通信设备, 只能选择地面通信系统, 地面通信系统的通信效果受气候条件的影响, 对于全球航行的船只, 则尽量选用 INMARSAT 卫星通信。

9.4 Inmarsat—C 系统

Inmarsat—C 系统是一个存储转发式的双向卫星系统, 采用数字化技术, 可以向用户提供卫星全球覆盖区内移动或固定数据通信和传输定位报告, 其通信速率为 600bit/s, 工作标准的移动卫星通信 L 波段。

Inmarsat—C 系统由空间段、卫星地面站和用户终端三个部分组成。用户终端通过一个 10cm 多高的全向天线, 以存储转发方式提供电传和低速数据 (600bit/s) 通信, 由于采用了压缩和复用等数字处理技术, 使得终端体积小、重量轻、能耗低, 从而成本低, 可靠性高。卫星地面站是卫星与陆地网之间的连接枢纽, 实现用户终端与公共陆地网种类用户以及其他用户终端的通信连接。空间段即卫星和相应的网控部分。卫星与地面站之间以 C 波段通信, 卫星与移动终端之间使用 L 波段通信, 卫星带宽 34MHz。

Inmarsat—C 主要提供数据、电传、文字传真等业务, 同时也提供数据报、轮询以及遇险报警等业务。许多型号的 C 终端内置有 GPS, 可以用来作为定时位置报告的手段。另外终端还可以通过具有 X.25 或 X.400 协议的 LES (局域网仿真服务器) 提供电子邮件服务。

1999 年 GMDSS 全球海上遇险安全系统在全球范围内全面实施, Inmarsat—C 以其高度的可靠性被列为海上 A3 区的必选的通信手段。

9.5 GMDSS 系统

GMDSS 的全称为 Global Maritime Distress and Safety System, 即全球海上遇险与安全系统, 该系统是国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 用于改善海上遇险、安全、通信, 建立的搜救程序, 并用来进一步完善海上常规通信的一套系统。GMDSS 系统主要包括 GMDSS 卫星通信分系统和 GMDSS 地面频率通信系统。

(1) GMDSS 系统的功能。

1) 报警。报警是迅速并成功地把遇险事件的信息提供给可能给以救助的单位。在 GMDSS 系统中, 报警含三个方面: 即船对岸报警、船对船报警和岸对船报警。报警信息应指明遇险船的识别号码及遇险船的位置, 并应尽可能提供遇险性质和其他有助于搜救的信息。

2) 搜救协调通信。GMDSS 系统能进行搜救协调通信, 亦即使搜救协调中心能通过岸站或岸台与遇险船及参与救助的船舶、飞机以及陆上其他搜救中心进行有关搜救的直接通信。

3) 搜救现场通信。在救助现场与救助的船舶之间, 在船舶与飞机之间, 在救助船与遇险船之间以甚高频无线电话为主的通信方式相互通信。

4) 寻位。遇险船舶或救生艇能发出一种特殊的无线电信号 homing (或译作归航信号), 便于救助船舶和飞机寻找到遇险船舶、救生艇等。

5) 播发海上安全信息。该系统提供各种手段发布航行警告、气象预报和其他各种紧急安全信息。

6) 一般公众业务的通信。GMDSS 还要求所配备的通信设备除了进行遇险、紧急和安全通信外, 还能进行有关公众业务的通信, 就是船舶与岸上管理部门、用户进行有关管理、调度及个人方面的通信。

7) 驾驶台对驾驶台通信。在驾驶台之间传递有关航行安全、避让等信息, 以及水上交通管制系统的 VHF 通信。

(2) GMDSS 系统中的通信系统及设备。GMDSS 系统中, 卫星通信系统由 Inmarsat (国际海事卫星系统) 和 COSPAS/SARSAT 极轨道卫星系统组成, 地面通信系统由 MF/HF/VHF 通信分系统组成。各通信系统完成的功能见表 7.4-6。

表 7.4-6 通信系统完成的功能

通信系统	功 能
Inmarsat 通信系统	静止卫星通信系统, 用于南北纬 70°以内的报警和通信
COSPAS/SARSAT 搜救卫星系统	极轨道卫星系统, 专用于搜救目的, 提供全球范围内的陆、海、空遇险事件的报警
中频 (MF) 通信分系统	近、中距离报警和通信
高频 (HF) 通信分系统	远距离报警和通信
甚高频 (VHF) 通信分系统	近距离报警和通信
岸基 NAVTEX 系统	海上信息 (msi) 的播发
增强群呼系统 (EGC)	

(3) GMDSS 系统的航区。GMDSS 系统中的船舶应配置的设备取决于它所航行的海区, 也称航区, 即按船舶的所航行的海区来决定船舶应配置的无线电设备。航区是以岸台使用各种频段无线电波覆盖的海域划分, 见表 7.4-7。

表 7.4-7 各种频段无线电波覆盖的海域划分

航区	海 域
A1 航区	指甚高频 (VHF) 岸台覆盖范围的海域, 一般是距海岸 25n mile 的海域范围
A2 航区	指中频 (MF) 岸台覆盖的海域, 一般是距海岸 100~150n mile 的海域, 但不包括 A1 航区
A3 航区	指国际海事卫星 (Inmarsat) 覆盖范围的海域, 一般是指南北纬 70°内的海域, 但不包括 A1、A2 航区
A4 航区	A1、A2 和 A3 航区以外的海域范围, 即南北纬 70°以外到两极之间的海域

(4) GMDSS 系统通信设备配置。根据 GMDSS 系统功能的要求, 船舶配置无线电设备的原则如下:

- 1) 船舶应按所航行的“航区”提供执行 GMDSS 功能的设备。
 - 2) 船舶配备的无线电设备应至少能两个通信系统中工作，以提供两种以上通信方式。每种方式应能采用独立设备执行连续报警功能。
 - 3) 装船的第一种无线电设备能执行两种以上的功能，与两种以上通信设备进行通信。
 - 4) 设备应操作简单、可靠、且可无人值守。
 - 5) 救生艇配备无线电设备的出发点是完成现场通信，以及能发射寻位信号，以便顺利地与搜救船只（或飞机）相配合，完成对救生艇的搜救工作。
- 船舶配备的 GMDSS 设备见表 7.4-8。

表 7.4-8 船舶配备的 GMDSS 设备

序号	设备名称	配 备 数 量			
		国际航行船舶		非国际航行船舶	
		A1+A2	A1+A2+A3	A1	A1 以外海区
1	VHF	1 台	1 台	1 台	1 台
2	NAVTEX	1 台	1 台	载客 100 人以上的客船 1 台	客船和总吨 500t 及以上的货船
	VHF-EPIRB			1 台	1 台
3	Satellite-EPIRB	1 台	1 台	载客 100 人以上的客船任选一种	客船和总吨 500t 及以上的货船 1 台
4	MF	任选一种	任选一种	任选一种	—
	MF/HF				
	Inmarsat				
5	TWO-WAY-VHF	2 台	2 台	2 台	客船和总吨 500t 及以上的货船 3 台，船长 20m 及以上但小于总吨 500t 船舶 2 台
6	SAIP	1 台	1 台	客船和总吨 300t 及以上的货船 1 台	客船和总吨 500t 及以上的货船 2 台，船长 20m 及以上但小于总吨 500t 船舶 1 台

9.6 船舶通信设备的日常维护

- (1) 防潮与防雷。潮湿的天气和雷电对通信设备的影响比较严重，由潮湿而引起的故障往往很难查出，所以应设法使设备保持干燥，可用电风扇对设备内部进行足够时间的吹风，再通电加热干燥，对于防雷击，主要是检查接地线是否接地良好，电台使用完毕要记住令天线接地。
 - (2) 减少设备振动。船舶摇晃和剧烈振动时，通信设备的线路板、接线和插头容易产生接触不良，令设备出现故障，所以在船舶进入恶劣省区航行之前，应做好必要的稳固措施，减少设备的振动。
 - (3) 设备除尘。尘埃吸收水分后容易使电路产生短路，带静电的尘埃则会对高频电路产生干扰，令电路工作混乱。设备防尘可以考虑：在电台间的通风口上加滤网，尽可能不穿脏衣服进入电报房和驾驶台；定期对设备表面和内部进行除尘处理。
- 设备内部除尘可以使用电器清洁剂喷洗或酒精擦拭，应特别注意的是，电器清洁剂属有机溶剂，禁止喷洒在含有塑料的元器件上，对设备的清洁应该在关掉电源的情况下进行，禁止带电操作。

9.7 通信天线的安装和维护

9.7.1 天线安装的注意事项

船用通信天线的种类繁多，以适应不同用途的需要。为了提高天线效率，减少船上物体对通信的影响，对船用中短波天线，安装时要求天线尽可能远离桅杆、烟囱、通风筒及其他金属物体，其最小距离不应小于 1.5m。对于 VHF 天线，则应保持更远的距离，以防止金属物体对电波传播的遮挡，同时考虑便于安装和日常维护。

由于卫星船站抛物面天线具有很强的方向性，任何金属物体对电波的遮挡，都会对通信造成影响甚至中断通信，因此，船站天线必须安装在四周空旷、无障碍物的船舶高处。船站天线与雷达天线相邻安装时，两者高度不能一致，以免相互干扰，或破坏各自设备的输入电路。一般要求船站天线至少高于雷达天线平面 11°处。对 B 船站和 C 船站，由于其波束宽度稍宽，因而要求与雷达天线的高度差更大些。C 船站与船用 HF 天线、VHF 天线、卫星船站天线及磁罗经等距离至少要保持 3~5m。

9.7.2 天线的日常维护

对船用天线的日常维护过程中，首先应做好各类天线的定期检查和清洁保养工作，防止天线的部分短路，特别应注意环境和自然因素对天线造成的影响和损坏，以免造成更大的损失。对船站天线，还要避免过热及大量烟尘附到天线罩上，造成对电波的衰减和影响，因此，对船站天线罩的定期清洁也是十分必要的。

第5章 船舶操纵及控制

1 舵机及航向控制

1.1 舵机简单控制

(1) 舵机简单控制定义。自动操舵仪的简单控制是通过简操手柄给出左转舵、右转舵和停舵的命令，操作人员首先给出转舵指令，然后通过目测舵角反馈机构传送来的船舶实际舵角决定是否停舵，从而使舵机转到期望的角度。

(2) 简单控制系统组成。现在大多数船舶舵机系统均采用液压系统作为船舶舵机执行机构，因此舵机控制系统仍然较为复杂，如图 7.5-1 所示，该系统包括简操手柄、舵角复示器、控制器、液压泵起动器、舵机液压系统、舵叶。

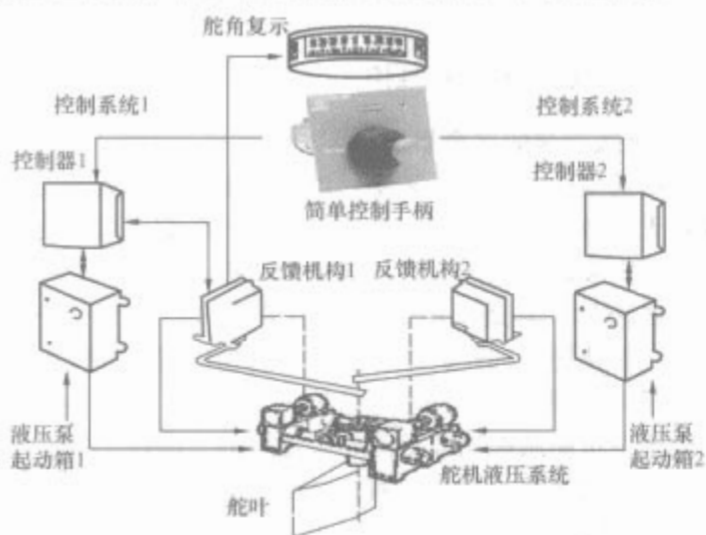


图 7.5-1 简单控制系统组成图

控制系统主要由转舵指令、放大装置、舵机执行机构组成，舵机简单控制系统的原理结构，如图 7.5-2 所示。除航向随动控制、自动控制，其他的操舵方法例如早期的人力转舵方法，均可以看作简单控制，其组成结构中可能不带放大装置或舵机执行机构。

简单控制系统实际上是开环控制，转舵指令大小和方向直接决定了舵机转动的快慢和方向。欲使舵机停下来，必须使输入量为零。现在多数舵机系统不对转舵速度的快慢进行控制，因此转舵指令多数情况下只有左转舵、停舵、右转舵三种。



图 7.5-2 舵机简单控制系统原理结构图

1.2 舵机随动控制

(1) 随动控制定义。自动操舵仪的随动控制是通过舵角反馈机构传送来的船舶实际舵角与操舵人员给出的指令舵角相比较，计算出控制信号控制舵机转舵，使舵机转到期望的角度。

(2) 随动控制系统组成。随动控制系统主要由指令舵角、放大装置、舵机执行机构、舵角检测反馈组成，如图

7.5-3 所示。与前面简单控制系统不同，该系统用舵轮给出不同的指令舵角，同时将舵角反馈信号引入到控制器中参与控制。

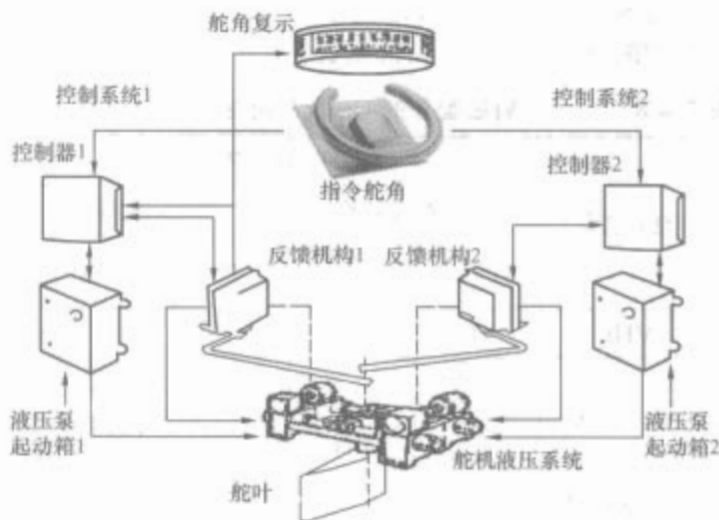


图 7.5-3 舵机随动控制系统组成图

(3) 随动控制工作原理。舵机随动控制系统的原理结构如图 7.5-4 所示。当舵轮给出舵角指令 δ_i ，它与舵角反馈机构输出的反馈舵角求差，得到转舵指令信号 $\sigma = \delta_i - \delta$ ，经放大后控制舵机转动舵叶直至 $\delta_i = \delta$ 。



图 7.5-4 舵机随动控制系统原理图

对于转舵速度可控的舵机系统， σ 的大小代表转舵速度的大小，符号代表转舵方向；对于转舵速度不可控的舵机系统（大部分液压舵机系统），只用 σ 的符号控制转舵方向。

对于转舵速度不可控的舵机系统，为了保证舵机的稳定性，随动系统的控制算法可用下式表示

$$\sigma = \begin{cases} 0 & |k(\delta_i - \delta)| < m \\ \text{sgn}[k(\delta_i - \delta)] & |k(\delta_i - \delta)| \geq m \end{cases} \quad (7.5-1)$$

式中： m 为控制的门限值； k 为放大倍数。 $\frac{m}{k}$ 决定了随动系统的灵敏度。

由于舵机的转舵速度较高，舵机随动系统常出现振荡现象。减小放大倍数 k 可以消除振荡现象，但同时会降低随动系统的灵敏度，这并不可取。为了解决这个问题，可调整上述控制算法为

$$\sigma = \begin{cases} 0 & |k(\delta_i - \delta)| < m \\ \text{sgn}[k_1(\delta_i - \delta) - k_2\dot{\delta}] & |k(\delta_i - \delta)| \geq m \end{cases} \quad (7.5-2)$$

附加量 $k_2\dot{\delta}$ 相当于给控制增加了一个提前量，即在舵机停到期望舵角之前给出停舵信号，通过调整系数 k_1 、 k_2 可以消除振荡现象，同时获得较高的灵敏度。

1.3 船舶航向控制

1.3.1 航向控制定义

自动操舵仪的航向控制是通过电罗经（或复示磁罗经）不断地把传送来的船舶实际航向与给定（希望）航向相比较计算出相应的指令舵角，再和舵角反馈机构给出的实际舵角相比较，计算出控制信号控制舵机转舵，使船舶自动保持在给定的航向上航行。船舶航向控制包含两种情况，即保持航向和改变航向。

1.3.2 航向控制系统组成

航向控制系统的结构图如图 7.5-5 所示，航向控制系统与随动控制比较增加了航向控制单元，其他部分与随动控制系统相同。其基本结构如图 7.5-5 所示。

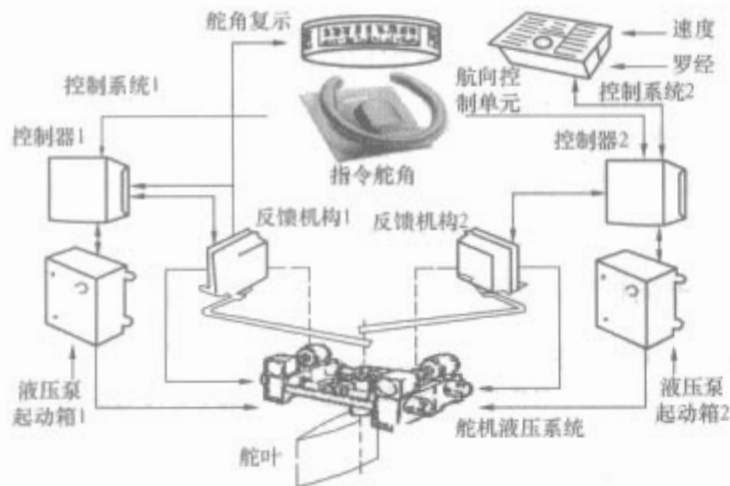


图 7.5-5 航向控制系统结构图

航向控制的基本原理框图如图 7.5-6 所示。控制过程为：由航向检测元件测得船舶实际航向 ψ 后将其反馈至系统输入端与给定航向 ψ_i 在比较机构中比较求差，得到航差（偏航信号） $\Delta\psi$ ，再经信号检测变换计算出指令舵角信号 δ_i 。然后，该信号与舵角检测元件测得舵角信号 δ 相比较给出控制信号，经放大后推动舵机转舵，进而控制舰船航向。

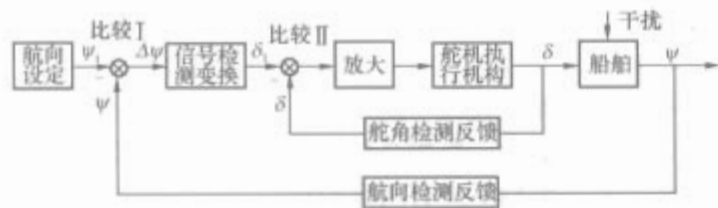


图 7.5-6 航向控制系统原理框图

航向控制系统中，舰船是控制对象，干扰是舰船偏航的原因，被调节的量是舰船航向。

航向控制系统是一个航向随动系统。它由以下基本环节组成：

信号检测变换元件：用来测量各种控制参数（如航向 ψ 、舵角 δ 等），并将其转换成合适的物理量。常用的器件有电罗经、自整角机、旋转变压器等。

比较元件：用来检测实际航向 ψ 与给定航向 ψ_i 间的差即偏航角 $\Delta\psi$ 、偏航角与舵角信号的差值。偏差信号可以是机械信号或电气信号。常用的元件有差动齿轮、运算放大器、微处理器。

放大元件：用来放大控制信号至足够的功率，以推动舵机转舵。目前常用的有半导体放大器、磁放大器、电气—液压放大器或电动机扩大机等。

执行元件：用来推动舵叶转动。一般采用电动舵机或液压舵机。

反馈元件：自动舵必须有两个反馈，即航向反馈和舵角反馈。航向反馈又称外反馈，一般由电罗经发送与接收机构组成，主要元件是自整角机。舵角反馈又称为内反馈，一般由舵机反馈机构发送与接收机构组成，发送舵角反馈信号的元件，军品一般采用自整角机或旋转变压器，民品常用电位器或串口。

1.3.3 工作原理

1.3.3.1 船舶航向控制有关的若干问题

(1) 船舶操纵特性。图 7.5-7 为船舶在左舵角 δ 的情况下，向左回转运动的示意图。图中，方位轴 N 坐标固定在地球表面； G 为船的重心； X 为船体首尾轴线； δ 为舵叶与 X 的夹角； ψ 为航向角，即 X 与方位轴 N 的夹角； r 为船舶回转角速度； R 为回转半径； V 为船舶对地速度； v 为横漂速度。

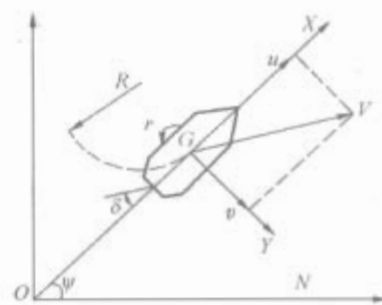


图 7.5-7 船舶回转运动

(2) 船舶操纵运动的数学模型。船舶航向控制主要是运用响应型模型进行理论分析，下面给出船舶的各种响应型模型。

二阶线性响应型模型

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (7.5-3)$$

$$T_1 T_2 \ddot{v} + (T_1 + T_2) \dot{v} + v = K_v(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (7.5-4)$$

一阶线性响应型模型

在低频下二阶线性转舵响应方程式 (7.5-3) 可近似简化为一阶转舵响应方程，即

$$T \dot{r} + r = K\delta \quad (7.5-5)$$

其中， $T = T_1 + T_2 - T_3$ 。

二阶非线性响应型模型

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r + \alpha r^3 = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (7.5-6)$$

一阶非线性响应型模型：

类似的，在低频下二阶非线性转舵响应方程式 (7.5-3) 可近似简化为一阶非线性转舵响应方程，即

$$T \dot{r} + r + \alpha r^3 = K\delta \quad (7.5-7)$$

(3) 定向航行的性能指标。在不考虑扰动的情况下，Norrbín 推导了船舶航行因艏摇和操舵运动而产生的附加阻力近似公式

$$\frac{\Delta R}{R} = k \overline{\Delta\psi^2} + \lambda \overline{\delta^2} \quad (7.5-8)$$

式中： $\overline{\Delta\psi^2}$ 为平均艏偏角； $\overline{\delta^2}$ 为平均舵角； $\frac{\Delta R}{R}$ 为相对附加阻力； k 、 λ 为与船舶有关的参数。

由式 (7.5-8) 可得船舶二次型性能指标

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta\psi^2 + \lambda \delta^2) dt \quad (7.5-9)$$

(4) 对改变航向控制的要求。

改变航向的控制如图 7.5-8 所示应含三个阶段：

加速阶段——以大的舵角使船加速转舵，尽快达到所期望的回转速率。

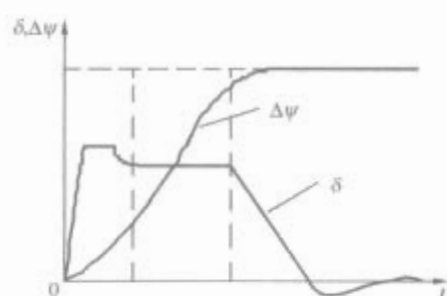


图 7.5-8 改变航向的三阶段曲线

稳定回转阶段——使舵转至与希望回转速率相对应的舵角，船以恒定回转率稳定回转。

制动阶段——当船进入新航向前，迅速减小舵角并反向打舵，使船舶迅速地、无超调稳定在新航向上。

1.3.3.2 船舶航向 PID 控制

直到 20 世纪 70 年代初期，常规自动操舵仪还是一个简单的控制设备，航向偏差给操舵设备提供修正信号，此时控制方程为

$$\delta_i = k_p \Delta\psi \quad (7.5-10)$$

式中： δ_i 、 $\Delta\psi$ 分别为舵角信号和航向偏差信号； k_p 为比例常数，它应被整定以适应载重和环境要求，为避免振荡， k_p 应取较低值。

对于稳定低速航行的船舶，式 (7.5-10) 控制效果基本上是令人满意的，但对不稳定的船舶，式 (7.5-10) 不合适。此时，应采用包含航向误差导数项，它的形式为

$$\delta_i = k_p \Delta\psi + k_d \dot{\Delta\psi} \quad (7.5-11)$$

当存在由横向风引起的下风或上风风力矩干扰时，为使航向保持不变，应加入航向偏差的积分项，此时方程式变为

$$\delta_i = k_p \Delta\psi + k_d \dot{\Delta\psi} + k_i \int_0^t \Delta\psi dt \quad (7.5-12)$$

这就是经典的 PID 控制律。

积分项的加入可能会降低舵的响应速度，这会使船舶反应迟钝，为抵消这种影响，可再加入一个加速项，这样控制方程又成为

$$\delta_i = k_p \Delta\psi + k_d \dot{\Delta\psi} + k_i \int_0^t \Delta\psi dt + k_{dd} \ddot{\Delta\psi} \quad (7.5-13)$$

对海浪高频干扰，PID 控制过于敏感，为避免高频干扰引起的频繁操舵，常采用“死区”非线性天气调节，但死区会导致控制系统的低频特性恶化，产生持续的周期性偏航，这将引起航行精度降低，能量消耗加大。

此外，当船舶的动态特性（速度、载重、水深、外型等）或外界条件（风、浪、流等）发生变化时，控制参数需连续地进行人工整定，不合适的控制参数的控制器将导致差的控制效果，如操舵幅度大、操舵频繁等，而人工整定参数很麻烦，为此，人们提出了自适应控制方法。

1.3.3.3 其他船舶航向控制

对有限维、线性和时不变的控制过程，传统控制法是非常有效的，如果这样的系统是充分已知的，那么，它们能用线性分析法表示、建模和处理，但实际船舶系统常具有不确定性、非线性、非稳定性，很难建立精确的模型方程，甚至不能直接进行分析和表示，而人工操作者通过他们对所遇情况的处理经验和智能理解与解释，就能有效地控制船舶航行。因此，人们很自然地开始寻找类似于人工操作的智能控制方法。目前已提出 3 种智能控制方法，即专家系统、模糊控制和神经网络控制。

(1) 专家系统。专家系统的关键技术是知识经验的获取与表示。专家系统模仿人工操作的专家系统方法，而并没有

直接使用船舶的数学模型，通过研究人工操作与普通自动舵控制之间的差异，建立了规则库以便修正自动舵的特性，也就是自动舵与基于规则的专家系统之间进行交互作用。这种的自动舵专家系统与船舶操纵模型无关。

(2) 模糊控制。模糊控制不需建立被控对象的精确数学模型，它的算法简单，便于实时控制。模糊控制系统由模糊化、模糊推理决策、反模糊化三部分组成，在实际应用中模糊控制系统取得了较好的控制效果，但由于受船舶控制过程的非线性、高阶次、时变性以及随机干扰等因素影响，造成原有的模糊控制规则粗糙或不够完善，影响了控制效果。为克服这些缺点，模糊控制器向着自适应、自组织、自学习方向发展，使得模糊控制参数或模糊规则在控制过程中自动地调整、修改和完善，从而使系统的控制性能不断改善，达到最佳的控制效果。

(3) 神经网络控制。神经网络具有非线性映射（逼近）能力以及自学习、自组织、自适应、分布存储、联想记忆、并行计算等能力。它的缺点是理论不成熟、实时性差、硬件实现成本高等。目前的神经网络控制器还处于软件仿真模拟阶段。

1.4 航向控制系统设计

1.4.1 性能要求

自动舵的技术性能在相关的国际、国内文件及标准中有各项规定。

(1) 转舵速度。不论用何种操舵方式转舵，操舵仪在平均转舵速度下应能稳定工作。安装在快艇和核潜艇上不低于 $5^\circ/\text{s}$ ；安装在大中型水面船舶上，单机工作不低于 $2.3^\circ/\text{s}$ ，双机工作不低于 $4.7^\circ/\text{s}$ 。

(2) 舵角限位。应设置舵角电气限位装置，当舵角转到极限位置前 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 时应断开电控制信号。

(3) 舵角复示误差。在规定的舵角范围，舵角反馈机构的舵角发送值与操纵台舵角复示间误差不大于 0.5° 。

(4) 随动操舵。操舵误差：当转舵速度符合规定值时，在舵角限位范围内，给定舵角值与复示舵角值之差不得大于 1° 。

动态品质：操舵过程中应平稳、无振荡、无超调。

(5) 零位稳定性。当指令信号为零，舵角应处于零位，转换操纵方式，舵角不应有明显变化。

(6) 自动操舵控制参数：①航向自动操舵仪最高灵敏度水面船舶不应低于 0.3° ，潜艇不应低于 0.2° 。②系统如果不具备航速变化和天气变化时的参数自适应功能，则应设置航向比例和微分调节器，不同位置所对应的转舵角，根据装船对象由产品规范规定。③应采取措施消除船舶受到恒值干扰时所产生的固定偏航。

(7) 起舵灵敏度：①自动工作不低于 0.3° 偏航角；②随动工作不低于 1° 偏航角。

(8) 自动稳定精度。水面船舶或潜艇以任意航向和规定的航速航行，操舵仪航向稳定精度如下：①海况低于 3 级时，不大于 1° ；②海况 3~5 级时，不大于 2° ；③海况高于 5 级时，不大于 3° 。

(9) 自动机动。水面船舶在规定的速度下航行或潜艇在水下以均衡速度或中速航行，操舵仪在自动方式机动时，应满足下列要求：

修正范围：航向 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，一次修正范围不小于 $\pm 15^\circ$ ，可连续修正。

动态过程：平静水域航向一次修正 15° 时最大超调量不

大于10%，振荡次数不大于1次。

(10) 自动、随动、手动操舵转换时间。在紧急状况下，舵叶在任何位置的转换时间不大于3s。

1.4.2 性能要求航向自动航的结构设计

如图7.5-9所示，航向自动航主要由操纵台、执行装置、接线及操纵部位转换箱、舵角反馈机构及限位器、遥控操舵器组成。

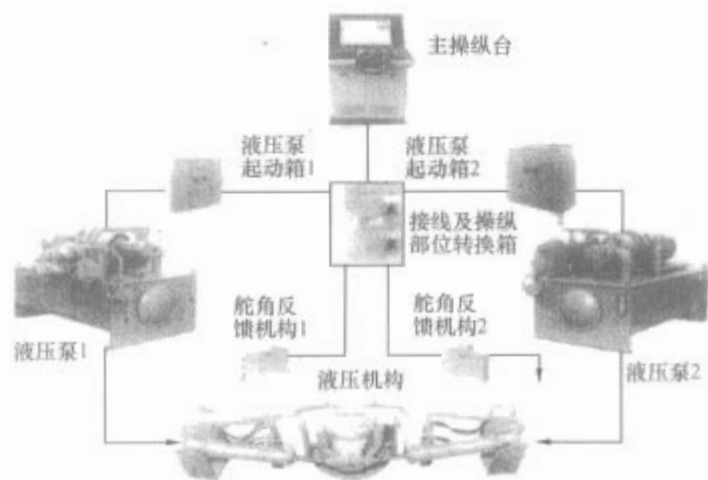


图 7.5-9 航向自动舵结构图

(1) 操纵台。操纵台是自动舵的控制部件，其结构形式分为三种：一单元结构操纵台、液压操纵台和独立的自动舵操纵台。一单元结构操纵台，为早期小型船舶使用，包括自动舵系统的全部环节：指令环节、比较环节、变换环节、放大环节、执行（伺服）环节、反馈环节，而调节对象为舵机系统的液压操纵部件或是电气机械操纵部件。液压操纵台，它是由手操舵轮控制液压缸驱动变量泵或定量泵，带动舵机转动舵叶。在转换成自动舵工作时，首先进行液压旁通阀及自动舵电源的联锁切换，由自动舵系统的执行环节驱动舵机的变量泵或定量泵，然后在自动操舵台进行自动操舵。独立的自动舵操纵台，是现代大部分船舶的操舵装置。它具有手操舵及自动操舵的全部功能。一般为二单元结构，即自动舵系统中的执行环节及反馈环节（舵角发送部分）设在舵机舱内，而其余命令、比较、变换、放大以及反馈环节的接收部分分别设在操纵台内。

(2) 执行装置。执行装置在自动控制系统内是执行环节，又称驱动装置、伺服装置，用于驱动舵叶转动。执行装置可分为驱动电动机型、电磁阀型、电磁液压换向阀型和电动发电机组型等几种类型。

驱动电动机有多种类型，一般分交流、直流两种。交流电动机为移相电容式，带有摩擦式制动器。直流电动机多为复励电动机，直流电动机的制动通过在转子两端并联能耗电阻实现。当断开左、右舵继电器电源时，由一组常闭触点接入能耗制动电阻。电动机制动装置能使舵机根据舵令作快速制动，并立即反转，提高了应舵灵敏度，适应舵机频繁起舵的要求。

部分自动舵的执行装置中，还包括有舵角反馈发送器以及舵角限位器。

电磁阀型，操纵台输出的舵令至舵机舱的执行装置控制箱，经中间继电器的触点给电磁阀线圈供电，或者直接给电磁阀线圈供电。驱动电磁阀的电源多采用直流24V。

电磁液压换向阀型，换向阀的电磁线圈为自动舵的执行装置，也是放大环节的负载。液压推动舵机液缸的柱塞移动进而带动舵叶转动。

电动发电机组型，该型自动舵系统无放大环节，输入为

电位器，它是电桥的一个臂，桥的负载（即执行装置）为产生励磁机磁场的线圈。自动系统的反馈环节为舵叶带动的另一只电位器，其构成电桥另一个臂。舵令发送电位器在操纵台内由分罗经的同步电动机带动。

当舵令为正舵时，电位器的活动接触器在电位器中间，这时舵叶在正中，由舵杆带动的反馈电位器的滑动接触点也在中间，电桥电路平衡，电动发电机组的发电机部分无电流输出，导致舵机电动机转子无电流，舵机电动机停在中间位置。

当船舶偏航时，分罗经同步电动机带动电位器接触器向右滑动，电桥失去平衡，电流流过励磁线圈，产生励磁磁场，发电机供电给舵机电动机，电动机转动舵叶转右舵，同时舵杆带动的电位器向左滑动，使电桥恢复平衡，励磁线圈的电流此时为零，舵叶停止转动，完成操舵。

(3) 接线及操纵部位转换箱。接线及操纵部位转换箱根据安装位置和设备内部的元器件配置，可分为两种类型。

1) 安装于驾驶室操纵台旁的电源控制箱。一般有电源转换开关、电源继电器、保护电路、电源变压器及功率放大元件或左、右舵舵令的中间继电器，执行装置及舵机机组的启动和停止按钮。

2) 安装于舵机舱的接线及操纵部位转换箱。除了上述功能外，还有如下功能：

a. 操舵部位转换开关。该开关经常置于驾驶室位置，当需要在舵机舱进行检查、维护时可将开关转换至舵机舱位置，这样可防止由于驾驶室操纵台上的误动作引起的事故。一般不允许置于空挡位置。

b. 操舵手柄。当上述开关置于舵机舱时，可用手柄进行简单方式操舵。

c. 舵角指示器。它与操纵台控制面板上的舵角指示器一样接收实时舵角信号。驾驶室内前方的舵角指示器与该舵角指示器分别属于两套独立的舵角发送指示系统。

d. 电缆转接。操纵台到执行装置和舵机机组的电源电缆、控制电缆、同步传送电缆等都经由电源控制箱转接。

(4) 舵角反馈机构及限位器。舵角反馈机构、限位器有两种设计安装方式，合并在执行装置内，其中包括：

1) 舵角同步发送机。

2) 步进反馈系统的三联凸轮控制微动发送开关。

3) 电桥电位器。

4) 电压反馈型的分压电阻箱和接触器，以及驱动二组可调限位位置的舵角限位器（包括凸轮及对应的微动开关），使左右舵角最大值为 35° 。

5) 单独的舵角反馈器和舵角限位器箱。一般将反馈元件输出轴用连杆与舵叶的转轴连接，把舵角的反馈信号同步传送到操纵台，完成自动舵系统的闭环调节。舵角限位器的结构则与上述类同。

(5) 遥控操舵器。遥控操舵器是一种具有防水结构的手持式小型操舵器。电缆长10m左右，用专用插头连接到操纵台或驾驶室前方的插座，一般在驾驶室两舷使用，以满足特殊情况下的操舵需要。工作原理是用旋钮转动一只小型电位器发出舵令信号，经操纵台内的放大环节放大，实现随动操舵，有刻度指示舵角值，并有左右 35° 舵角限位，以及正舵位置。

1.5 常用自动舵介绍

HD系列自动舵是我国设计生产的自动舵系列产品之一，包括的型号有HD-1、HD-5LA、HD-5Lk、HD-5TD、

HD-10 等。通过选用执行装置可以与不同类型舵机配套使用,如各种变量泵、定量泵、电动发电机组等型式的舵机。操舵仪中航向控制采用经典 PID 控制算法,控制参数通过手动调节。各种控制功能主要是采用模拟器件和少量的逻辑器件实现的。整个操舵系统中包含两套完全独立的控制系统,配合双机组的选择使用,从而提高了可靠性。

该系列操舵仪在设计和实现中突出强调系统的可靠性,实践表明,该型操舵仪运行可靠,故障率很低。其缺点是,操作不很方便,控制方法相对比较落后,在船舶航行过程中对海况、速度、装载等因素的适应性较弱。

HD 系列自动舵的结构组成如图 7.5-10 所示,整个仪器由主操纵台、简易操纵台、接线箱、反馈机构、起动器、转换箱等组成。各部分的主要组成如下。

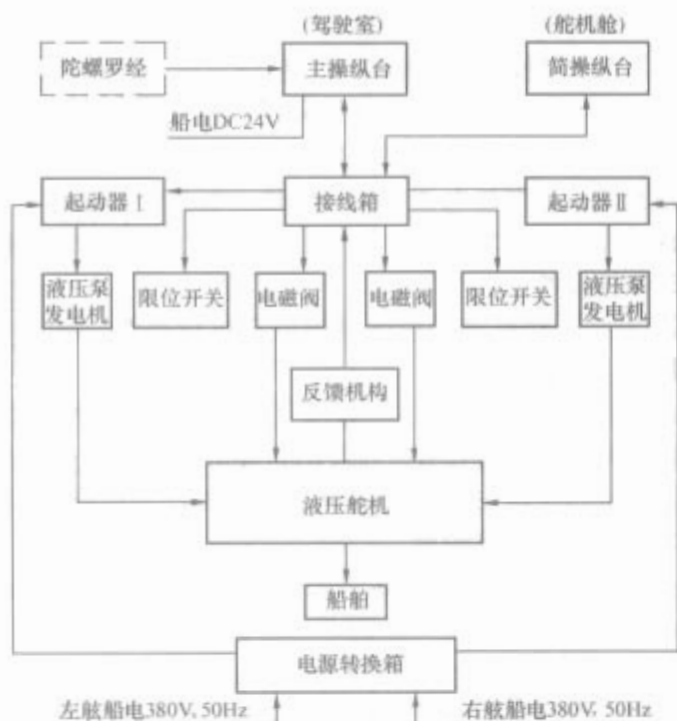


图 7.5-10 HD 系列自动舵结构图

(1) 主操纵台。主操纵台分台式、立式两种,它是 HD 系列自动舵的主要部件。操纵台包括各种微型电动机、开关旋钮、电路板、简单操纵手柄、随动舵轮等。

微型电动机包括航向复示电动机、航向接收电动机、航差电动机、舵角指令电动机、舵角复示电动机。

开关旋钮有航向匹配旋钮、航向修正旋钮、操纵方式选择开关、通道选择开关、部位转换开关、微分调节开关、比例调节开关、自动调节转换、手动调节转换开关、手动调节电位器、积分开关、数字航向匹配开关、报警检查按钮、消音按钮。

电路板有电源功放板、综合放大器板、报警板、显示板。

(2) 简易操纵台。简易操纵台分台式和立式两种。操纵台包括各种微型电动机、开关旋钮、电路板、指示灯、简单操舵手柄,随动舵轮等。

(3) 接线箱。接线箱为壁挂式,一般装在舵机舱,用于连接各分仪器,并装有操纵部位转换开关。

(4) 反馈机构。反馈机构设置在舵机舱,用于发送舵角同步信号和舵角反馈信号,包括:操纵台舵角复示的发送机、舵角反馈传感器以及限位开关。

(5) 起动器。起动器有两个,用以起动舵机机组,并给操舵仪系统供电。

(6) 转换箱。用于将两舷船电进行自动切换后向两个起动器供电,内部装有两个接触器,当两舷船电均供电时,遵

循快者优先原则,哪舷电源先送电,便接通这舷电源。

2 航迹控制

2.1 航迹控制的概念

航迹控制是指控制舰船自动沿某一计划航线运动,使舰船的航迹与计划航线保持一致。航迹控制也叫航迹跟踪,它是船舶航行自动化的关键问题。传统的航行控制因无法获取连续的船位信息,一般通过不断地改变舰船航向来实现航迹控制。如图 7.5-11 所示,航迹保持操纵过程为①驾驶员通过海图或定位系统确定船位,确定计算航迹偏差;②根据航迹偏差与当时的海况和风流情况,设定新的航向;③利用航向自动控制或手动操作保持设定的新航向,向计划航线靠近。

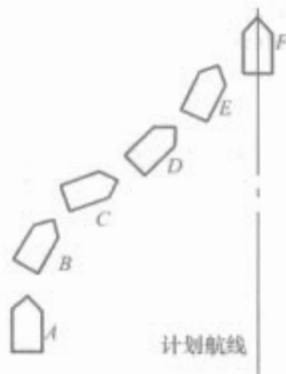


图 7.5-11 传统航迹控制示意图

以上操舵过程的效果与驾驶员的经验有很大关系,在恶劣海况时往往偏航较大。用传统的方法使船舶跟踪计划航线,驾驶员的劳动强度很大,另一方面船舶在复杂海域、渔船作业区、狭窄水道及进出港航道航行时,随着船舶数量增多、航速提高以及超级油轮的出现,使得碰撞的危险也在加大。

采用航迹自动舵自动控制舰船跟踪计划航线,可大大提高跟踪精度,提高航行安全程度,降低驾驶人员的劳动强度。对于一些需要精确保持航迹的任务场合,航迹自动舵具有重要的应用价值,例如进行科学研究及海洋开发时的海洋大地测量、海底电缆铺设、石油勘探等,执行军事任务时的布雷、扫雷、护航、战术编队等,进行保证生产作业时的矿船采矿、航道疏通、渔船作业等。上世纪 90 年代由于 GPS 导航仪的普及应用,其廉价、定位连续准确、可全天候在全球范围使用的特点,较好地解决了航迹控制的定位问题。智能控制技术如模糊控制、神经网络、专家控制随着计算机的普及也有了深入的研究和广泛的应用,这些技术推动了航迹自动控制系统的发展。

由于船舶操纵运动呈一定的非线性,其动态特性与船型、装载、船速、吃水等有密切关系,操纵机构有明显的滞后、死区、继电、速率限制等特性。另一方面船舶在大洋航行时所受的环境干扰十分复杂,有骤风、高频浪、海涌、过船等瞬时干扰,也有季风、低频浪、潮汐、洋流等长时干扰,因而航迹舵的设计一直是一项高技术难题。

2.2 航迹控制系统的组成

解决航迹控制问题一般采用分层方法,一般将其分为规划、导航、引导和控制三层。规划层根据航行海区的气象、水文、交通情况给出计划航线。要实现航迹控制单纯依靠航迹自动操舵仪是不够的,必须构成一个完整的系统,其最基本组成部分也必须包括规划、导航、引导和控制三个层面:

(1) 航行计划系统。用于制订航行计划,即确定好计划航线,计划航线是航迹控制的目标。计划航线一般在电子海图系统(ECDIS)上设置,有的舰船另外配备了综合导航显控台,也可在综合导航显控台设置计划航线。

(2) 导航定位系统。用于连续确定舰船的瞬时位置、航速、航向、航向变化率等,并计算导航参数。常用的定位设备有GPS卫星导航仪、GLONASS卫星导航仪、罗兰C无线电导航仪、惯性导航系统等。在航迹控制系统中一般配置两台定位设备,一个参与航迹控制环节,用于确定舰船的偏差量,另一个用于对航迹控制下的船位进行独立监视,以保证航行安全。通常采用罗经或磁罗经确定舰船航向,并通过航向信号发送箱向操舵仪反馈模拟的或数字的航向信息。舰船的速度信息一般来自计程仪,也可以通过船位滤波计算得到。

(3) 操舵控制系统。核心设备是自动操舵仪,操舵仪根据舰船的偏航、舵角、航向、速度等瞬时信息及其变化趋势,控制船舶操舵,通过改变船舵角,控制舰船航向并进而控制舰船航迹,使舰船沿着计划航线航行。操舵仪需要的导航数据来自于导航定位系统,需要的舵角信息来自舵角反馈机构。

更复杂的航迹控制系统还包括避碰功能,系统可根据引入的APPA雷达信息和避碰策略,需要避碰时临时改变计划航线实施避碰,避碰完成后回到原计划航线。

航迹控制系统是综合船舶系统(IBS)的核心部分,航行计划管理系统(VMS)与自动操舵控制是IBS的核心问题。图7.5-12所示为一个典型的航迹控制系统的组成及其信号流向图。

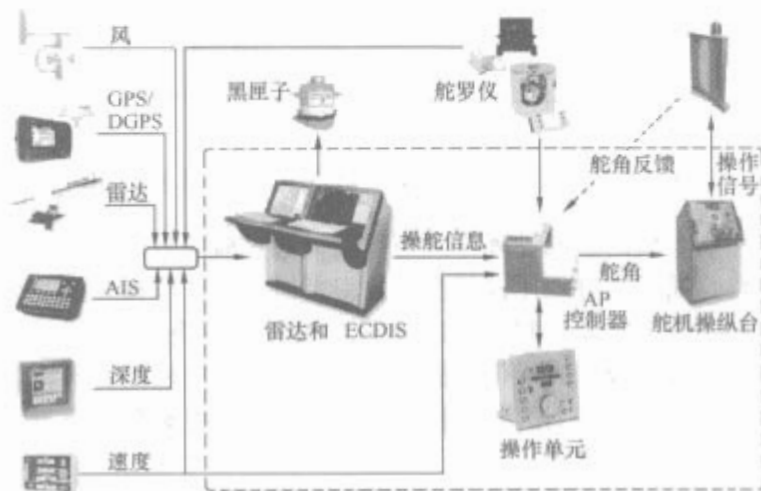


图 7.5-12 航迹控制系统的典型组成

2.3 航迹控制系统的性能要求

国际海事组织(IMO)海上安全委员会MSC.74(69)号决议的附件2,提出了对航迹控制系统的性能标准,包括功能、精度、显示报警、人机界面标准、环境适应性、接口等方面,主要内容如下所述。

(1) 功能。

1) 操纵方式。航迹控制系统应能实现对船位的控制:①控制舰船到达某一航路点;②控制舰船沿着一系列航路点的航线航行。

2) 进入航迹模式的要求。进入航迹控制模式前,操作者必须确认当时的船位、航向偏差、船舶操纵性能等因素能满足可靠进入控制航迹的条件。

3) 具有一套主定位系统。用于航迹控制的主定位系统应该是国际海事组织认可的电子定位系统(EPFS)。

4) 具有位置监控设备。具有另一套独立的定位设备,

用来连续监控船舶位置。该定位设备可不整合到航迹控制系统中。

5) 及时的转向显示。在跟踪一系列航路点构成的计划航线过程中,至少要在到达转向操舵点之前1min,显示航线的变化。

6) 实际航迹向的变化及其确认。①在跟踪航线过程中,在航线转向操舵点位置要发出告警;②要为操作人员提供能确认在航线转向操舵点之后的航迹向发生变化的方法;③无论操作者是否响应了确认信号,应保证船舶自动跟踪航迹;④如果在转向后30s内,操作人员仍然没有对实际航迹向的变化告警进行确认,那么要再提供一个备用的导航告警。

7) 改变航路点。在跟踪计划航线过程中,不能修改目标航路点、出发航路点及前方到达航路点,除非完成了新计划航线的设计并具备应用新航线进行航迹跟踪的条件。

8) 转向性能。操舵仪应该能够控制船舶以预先设定的半径,或根据预先设定的转向速率计算得到的半径从一个航线段转向另一个航线段,此半径要在船舶的性能范围内。

9) 对舵机参数的适应性。航迹控制系统应具备通过手动或自动方式调节参数的能力,以满足不同舰船在不同的天气、不同的速度以及不同装载条件下的操纵特性。

10) 允许误差。要采取方法避免由于舰船正常的艏摇、偏航、统计意义上离散定位误差引起操舵。

11) 人工干预功能。应该能够接受手工简易操纵,能停止航迹控制模式转换为手工操纵模式。

12) 航向控制模式。应具有航向控制模式,此模式应符合航向控制系统的性能标准。

13) 手动改变航迹控制到手动操纵方式。①舵角处于任何位置都应能从航迹控制转换到手动操纵的方式;②在任何条件下,包括航迹控制系统故障,都应能从航迹控制转换到手动操纵方式;③转换到手工操纵方式后,若要返回到自动控制模式,则必需操作人员干预。

14) 手动改变航迹控制到航向控制。①在任何条件下都应该能从航迹控制模式转换到航向控制模式;②航向控制系统应该将当前的实际航向作为当前的设定航向;③从航迹控制模式返回到航迹控制模式则必需操作人员干预。

15) 操舵模式显示。应该提供信息充分显示当前的操舵模式。

16) 航向监测。应提供独立航迹控制系统的航向数据来源,以监测舰船的实际航向。

(2) 精度。应该在航迹控制系统的文件中向使用者定性说明以下因素对航迹控制的影响:①位置、航线和速度传感器的精度;②航向和速度的变化;③实际对水速度;④环境条件。

(3) 显示报警。

1) 不能供电或电源功率不足。当航迹控制系统缺电或电源功率不足影响系统安全工作时,应当报警。

2) 位置监控报警。当位置监控系统检测到舰船偏离航线的距离超过预设极限值时,应当报警。

3) 航向监控报警。当航向监控系统检测到舰船航向偏差超过预设极限值时,应当报警。

4) 传感器失灵和报警。正在使用的定位传感器或航向传感器故障时,或发出报警信号时:①应在航迹控制系统生成报警信号;②系统应指导操作人员转换到安全的操纵模式;③若在30s内值班人员没有确认故障报警信号,应发出一个备用的导航报警。

5) 故障信号的使用。不能选择任何含有故障或者有报

警状态的传感器信号。

6) 偏航迹报警。如果船位航迹偏差超过预定的极限值应报警。

7) 航差信号。如果船舶实际航向偏离航线超过预定的极限值应报警。

8) 低速报警。如果对水速度低于操纵船舶所需的最低速度应报警。

(4) 人机界面。

1) 对航迹控制的调节。①应提供连续两个航路点间的航线参数的计算; ②可调整转向半径和转向速度、航迹控制有关的各种极限值、报警及其他控制参数。

2) 控制方式的改变。①航迹控制到人工控制: 单人就可以完成从航迹控制到人工控制模式的转换; ②航迹控制到航向控制: 如果航迹控制系统和航向控制系统是协同工作的, 单人就可以完成从航迹控制到航向控制方式的转换; ③转换控制方式的位置: 操纵方式的选择开关应该位于或邻近主驾驶室。

3) 连续信息显示。以下信息应该明确、持续显示: ①操舵方式; ②实际使用的位置, 航向和速度信号; ③传感器的状态和故障情况; ④航迹向和实际航向; ⑤实际船位、偏航距离、速度; ⑥目标航路点和前方航路点; ⑦到目标航路点的时间和距离; ⑧下一航线段的方向; ⑨选用航线的名称或标识。

4) 需要提供的信息。①计划航线的航路参数列表, 包括航路序号、坐标、两个航路点间的距离和方位、转向半径和转向速度; ②航迹控制相关的各种的极限参数和其他预设的控制参数。

5) 信息表达逻辑上相关的参数应当成对显示, 如预设值和实际值。

(5) 接口。

1) 传感器。航迹控制器应该与满足标准的位置、航向和速度传感器连接, 航向应由陀螺罗经提供。

2) 状态信息。所有连接的传感器都应该能提供状态信息, 包括故障信息。

3) 标准。航迹控制系统应能与船舶导航系统进行数字和串行通信, 并且遵照相关国际标准。

(6) 故障应对措施。

1) 航迹控制或位置传感器失灵。①如果航向控制仍然可用, 那么系统应该自动转换为航向控制方式, 并将当前实际航向作为设定航向; ②如果航向控制也不可用, 那么应当保持舵角。

2) 航向测量系统失灵, 此时应当保持舵角。

2.4 航迹控制器的设计

2.4.1 航迹跟踪要解决的问题

折线型计划航线每两个航路点之间都是直线, 中间的每个航路点都是转向点。曲线型的航线没有转向点的概念, 曲率半径较大的弧线相当于直线航线, 航线曲率较小的位置相当于折线航线的转向点。因此航迹跟踪可归纳为直线航段的跟踪和转向控制两个问题。

(1) 在计划航线的直线段, 要求高精度跟踪航线、保持航迹。在跟踪航线时, 其控制的目标是: ①舰船偏航量在允许范围内, 即舰船位置始终在计划航线附近; ②航迹误差角接近零, 即舰船的航迹向要与计划航线的方向一致(对曲线航线, 与计划航线切线方向一致); ③操舵次数尽量少, 使能量消耗尽量小。

(2) 到达计划航线的转向点附近时要实施自动转向控制, 即通过操舵控制舰船转向新的航线段。转向通常有两种要求: ①控制舰船按照给定的转弯半径转向; ②控制舰船按照给定的航向变化率转向。

2.4.2 航迹控制器的基本实施方案

航迹控制通常有三种基本的实施方案, 即指令航向法、指令舵角法、直接舵令法。

(1) 指令航向法。指令航向法又称间接控制法, 该方法把航迹问题看成一系列航向跟踪问题, 将航迹控制分解成航迹控制环与航向控制环, 航迹控制环根据船位偏差及其他信息不断给出指令航向, 由航向控制环实现航向修正, 从而间接完成航迹控制。

指令航向法航迹操纵控制系统原理框图如图 7.5-13 所示。系统由三个闭环即舵角控制环、航向控制环、航迹控制环组成。航迹控制环将定位设备(如 GPS)接收的船位与计划航线比较, 获取航位偏差信息, 通过航迹控制算法得到指令航向并传递给航向控制环; 航向控制环则将采集的罗经航向信息与指令航向比较, 发出指令舵角给舵角控制环; 舵角控制环驱动舵机使舵角检测值与指令舵角一致, 从而实现了船舶航迹控制。该系统去掉的航迹反馈与控制环节就是航向自动舵, 再去掉航向反馈与控制环节就转为随动操舵。系统通过开关选择使用航迹控制方式或航向控制方式, 这种方式非常便于原航向自动操舵仪的升级。

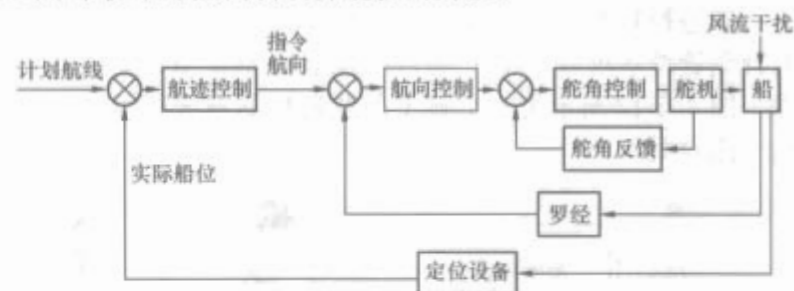


图 7.5-13 指令航向法航迹间接控制原理框图

指令航向法的处理方式与驾驶员通过航向自动舵操纵船舶跟踪航线的过程比较符合, 故很容易将驾驶与操纵经验融入控制器。航向控制与航迹控制之间可在线快速平滑切换, 在定位设备故障时, 仍然能保持对船舶的航向控制, 但将航迹控制化解为系列的航向控制问题, 从航迹控制角度看不利于系统的整体优化。

对于现有的航向自动舵, 若具有指令航向的数字接口, 用这种方案, 只要增加一个独立的航迹控制器即可非常方便地升级为航迹自动舵。

(2) 指令舵角法。指令舵角法又称直接控制法, 该方法根据建立的舵角与航迹偏差、偏航角度、偏航角速度等参数的内在关系, 直接计算指令舵角, 通过控制舵角来改变舰船运动轨迹消除航迹偏差。该方案能对位置、方向、速度这些实际上耦合的参量进行综合考虑, 可达到的控制性能更优良, 能很好地协调航迹跟踪性能与舵机能耗之间的关系。

采用指令舵角法的航迹控制系统由航迹控制环和舵角控制环组成, 其原理框图如图 7.5-14 所示。航迹控制环根据船位偏差、航迹向偏差、舰船速度等参数, 直接计算出指令舵角, 送到舵角控制环; 舵角控制环驱动舵机, 使实际舵角与指令舵角一致, 以实现船舶的航迹控制。

该原理方案中没有出现航向控制环节, 实际构成一个航迹控制系统时, 必须包括航向控制功能, 可以增加一个的航向控制模块, 与航迹控制模块并联, 构成一个双通道控制模

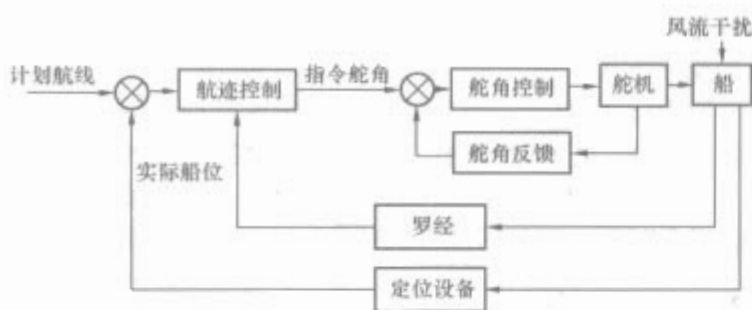


图 7.5-14 指令舵角法航迹直接控制原理框图

块，替代单一功能的航迹控制模块，由开关进行切换，两者共同使用舵角控制环。航向控制模块对罗经来的实际航向与用户设定的指令航向进行比较，计算出指令舵角送到舵角控制环，实现航向控制。

图 7.5-12 所示的典型航迹控制系统组成图中，控制器 AP2000 与操舵仪是物理上分开的，操舵仪实现舵角随动控制，控制器 AP2000 向操舵仪输出的就是指令舵角。

(3) 直接舵令法。将舵角反馈信号直接纳入航迹控制计算环节，航迹控制模块直接给出操舵信号，是一种更直接的航迹控制方法，称直接舵令法。此时航迹控制不再需要舵角随动模块支持，航迹控制环节是一个有机的综合体，如图 7.5-15 所示。

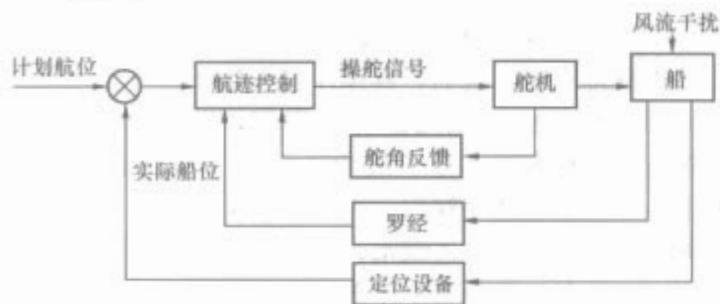


图 7.5-15 直接舵令法航迹控制原理框图

2.5 典型的航迹控制系统介绍

(1) 日本 Tokimec 公司的 PR-8000 自适应自动舵。日本 Tokimec 公司的 PR-8000 自适应自动舵，是一种模块化结构的自适应自动舵，有自适应和 PID 两种控制模式，有自动、手动、非跟踪和遥控操舵四种工作模式，为提高可靠性和安全性，采用双罗经配置，PR-8000 自适应自动舵如图 7.5-16 所示。自适应部分采用模型参考自适应控制器，可以根据航向、船速和舵角自动估计船舶动态特性。整个系统采用模块化结构，扩展灵活，可以根据用户要求，选配航迹控制模块，即航迹舵系统，以满足用户的不同需求。



图 7.5-16 PR-8000 自适应自动舵

PR-8000 自动舵的基本功能包括：

- 1) 航向保持。有限制水域和开阔海面两种工作方式，可以进行相互转换。
- 2) 航向改变。采用模型参考自适应控制，以固定转动

速率完成航向改变。

3) 参数调节。由水手调节操舵模式、天气参数、速度和舵角限制等。

4) PID 控制。根据航向偏差信号和舵角信号进行自动伺服控制。

5) 辨识部分。通过手动操舵模式、自动航向改变模式和速率操舵模式进行船舶动态特性的估计。

航迹控制部分包括三个功能模块，航行计划模块、定位模块和航向保持模块，有狭窄水域和宽阔水域两种航行模式。

1) 航行计划模块。通过设置转向点编辑航线，有恒向线航行、大圆航行和混合大圆航行三种方式。

2) 定位模块。使用 GPS 实时确定船舶实际位置。

3) 航向保持模块。自动决定最优船艏向，在转向点处自动改变航向，保持船舶航行。

系统采用指令航向法实现航迹控制，系统通过精确的定位装置连续地确定船舶位置，与预先设定计划航线比较，如果船舶偏离航线，航迹控制器根据航迹偏差信号、速度信号和实际航向信号计算出最佳航向，送到自动舵作为指令航向，控制船舶操舵，使船舶沿指令航线航行。当船舶接近航线上的转向点时，系统自动通知操纵者，经操纵者确认后，自动改变航向，航迹模块自动控制自动舵直至船舶到达目的地。由于船舶定位和航向设置等工作由计算机完成，操纵者可以集中精力注意碰撞等危险，航迹舵达到了提高安全性的目的，同时，由于在自动航行中，系统采用最佳路线，船舶能够得到经济而及时的控制，保证航行的经济性和准时性。

(2) 德国 Ansuchz 公司 PilotStarD 操舵控制器。Ansuchz 公司操舵控制产品是系列化的，PilotStarD 是其中一种操舵控制单元。

PilotStarD 是数值化产品，其操作模式有：航向控制、航迹控制、手动控制、外部航向控制。

PilotStarD 通过计算指令舵角实现航向和航迹控制。PilotStarD 接入罗经或磁罗经信号可进行航向控制，可自动适应各种船速，可以按照选择的变化速度改变航向。连接有定位设备时，可进入航迹控制模式。通过 LCD 可显示航向、设定航向、航迹偏差、速度、舵角等数据。具有视觉报警和声音报警。

PilotStarD 可接收的外部信号有：

- 1) 具有数字接口的罗经航向，如 Ansuchz 公司 STD. 20 数字罗经，或接 6Steps/° 的数字信号。
- 2) 具有数字接口的磁罗经航向信号。
- 3) 计程仪信号、200 脉冲/n mile，或 NMEA 格式。
- 4) 来自导航仪或电子海图系统 ECDIS 的船位。

Ansuchz 公司类似的操舵控制产品还有 NautoPilot 20X5 系列、NautoPilot NP60、NautoPilot-W1 等。图 7.5-17 是利用 NautoPilot-W1 操舵控制器构成的航迹控制系统。NautoPilot-W1 也采用了直接控制法，直接给出指令舵角。

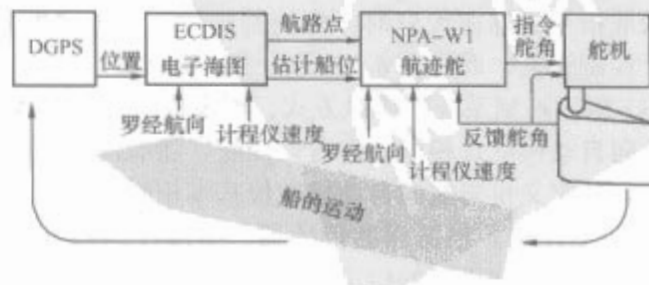


图 7.5-17 NautoPilot-W1 构成的航迹控制系统

3 深度与均衡控制

3.1 深度控制原理

(1) 深度控制系统定义。根据深度传感器、倾角传感器等检测的实际航行深度和纵倾角信号与给定航行深度和纵倾角进行比较,并通过解算装置自动解算艏升降舵(或围壳舵)和艉升降舵的转舵指令,由舵机随动系统按给定指令进行转舵,使潜艇保持或改变预定深度和纵倾角航行的全套仪器称为深度控制系统。

(2) 深度控制系统组成。深度控制系统一般由安装在驾驶舱的主操纵台、检测实际下潜深度的深度传感器、检测实际纵倾角的纵倾传感器、按调节规律自动完成舵角指令计算的运算放大器、驱动舵机转舵的执行机构以及检测实际舵角的舵角反馈机构等六个不可缺少的部件组成。为了改善控制品质,有些深度自动操舵仪还加装了测量纵倾角变化速度的角速率陀螺仪、测量横倾角的横倾传感器和专用的深度偏差积分机构以及线加速度计和角加速度计等。

(3) 工作原理。深度控制系统的工作原理框图如图 7.5-18 所示。潜艇在水下航行时,在外干扰和艏、艉升降舵角作用下航行深度发生变化时,浮潜深度由深度传感器检测并变换为电信号 H 后,在综合放大器中与期望给定深度 H_0 进行比较,当两者不一致时,其差值 $\Delta H = H_0 - H$ 经运算后形成艏、艉舵转舵角指令 δ_{b0} 和 δ_{s0} 分别送入艏、艉“随动操舵系统”,由随动舵机系统保证实际的艏、艉舵角 δ_b 和 δ_s 跟踪指令舵角,即分别在艏、艉综合放大器中与艏、艉反馈机构传送的实际艏、艉舵角进行比较,不相符时,其差值电压 $\Delta\delta_b = \delta_{b0} - \delta_b$ 和 $\Delta\delta_s = \delta_{s0} - \delta_s$ 经放大后,驱动艏、艉执行机构,控制艏、艉舵机推舵,直到两者一致为止。

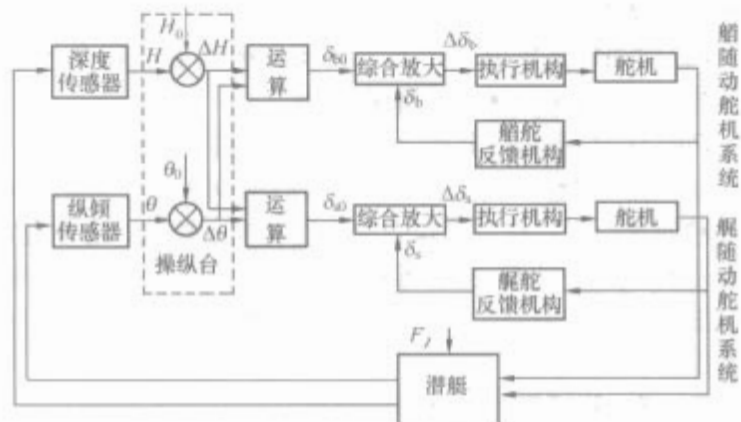


图 7.5-18 深度控制系统工作原理框图

潜艇在艏、艉舵角所产生的力和力矩作用下,向给定深度 H_0 变化的同时,纵倾角也会发生变化。正常情况下,指令纵倾角为零,所以纵倾传感器所检测到的实际纵倾角信号在综合放大器中与深度偏差值相抵消,故纵倾角达到一定值时,舵角指令值将趋向于零或反向,保证潜艇不超过规定的纵倾角;在接近给定深度时, ΔH 减小, δ_{b0} 或 δ_{s0} 反向,用相反舵角压回纵倾角,保证潜艇平稳地过渡到指令深度。在设计操舵指令运算放大器时,按控制规律,一般艏舵 δ_{b0} 主要用于控制深度,而艉舵 δ_{s0} 主要用于控制纵倾。

(4) 深度控制系统的操纵方式。深度控制系统的操纵方式与航向自动操舵仪相同,有自动操舵、随动操舵、简单操舵三种,其定义也与航向自动操舵仪基本相同。

1) 自动操舵。根据深度传感器、纵倾传感器等输出的深度和纵倾信号与设置的给定深度和纵倾角进行比较,通过运算,自动操纵艏、艉升降舵机转舵,使潜艇保持原深度和

零纵倾角航行,或按规定的纵倾角自动机动到新指令深度航行的操舵方式。

2) 随动操舵。分别按艏、艉舵轮或其他操舵信号发送器发送的艏、艉指令舵角信号转动艏、艉舵的操舵方式。

3) 简单操舵。分别按艏、艉“操舵手柄”或其他操纵装置发送的艏、艉舵转舵方向信号转动艏、艉舵的操舵方式。

3.2 均衡控制原理

为了保证潜艇水下垂直面内运动的稳定性和机动性,潜艇正常航行时常采用均衡控制方法来控制潜艇的姿态角和下潜深度。

潜艇因主压载水舱充满水而潜入水下后,一般很难保证艇体重量与浮力相等,为此在潜艇的重心附近的耐压壳体内,设有专用的 I 号和 II 号两个浮力调整水舱,通过从此舱向舷外排水或从舷外向里注水来补偿剩余浮力。此外,在潜艇的艏、艉部耐压壳体内还各设有左、右舷分开的平衡水舱,通过由艏向艉或由艉向艏移置平衡水舱的水来平衡纵倾力矩,以保持零纵倾,即使剩余浮力和力矩均为零。当潜艇潜入水下航行后,经过补充均衡,其重量与排开水的重量相等,即剩余浮力为零;艇内载荷及艇体重量的分布保证潜艇处于水平状态时的重心与浮心在同一条垂直线上,即力矩差为零。

(1) 潜艇的潜浮过程及潜浮稳性。

1) 潜艇的潜浮过程。潜艇上浮或下潜是通过对主压载水舱注水或排水来实现的,其操作过程如下:

a. 常下潜。经过预均衡后的潜艇,以均衡速度航行,水下进行补充均衡的速度一般为 4~6kn mile。在打开艏组和艉组主压载水舱通海阀后,再打开艏组和艉组主压载水舱通气阀时,这些水舱即进满水,艇重增加,下沉至半潜状态(潜势状态)。在打开艏组主压载水舱通海阀后,再打开艏组水舱通气阀时,艏组主压载水舱注满水,潜艇重量增加到水下排水量,潜艇开始下潜,待艇体全部浸入水中后,用艏、艉升降舵保持艇长要求的纵倾角继续下潜,直至接近潜望深度时用艉舵压回纵倾角,同时用艏舵保持预定深度,然后艇长下令由机电长指挥艇员进行补充均衡。

b. 常上浮。正常上浮时,潜艇以均衡速度航行,先用升降舵将潜艇操至潜望深度,在通海阀开启、通气阀关闭的情况下,先打开艏组高压吹除阀,吹除艏组主压载水舱中的水,潜艇重量减轻,潜艇上浮,同时用艉舵保持规定的纵倾角,使潜艇上浮至半潜状态后,艉舵保持上浮舵防止潜艇突然下沉,再打开艏、艉组低压吹除阀,用柴油机废气(常规动力潜艇)或低压气(核潜艇)吹除艏、艉组主压载水舱中的水,潜艇重量逐步减至水上正常排水量,即过渡到水上状态,同时将艏、艉升降舵回零。

c. 急下潜。应急下潜时,预先打开快潜水舱通海阀和通气阀使快潜水舱充满水,然后同时打开艏、舯、艉三组水舱的通海阀和通气阀使这些水舱全部进满水,潜艇快速下沉,至半潜状态时,应立即吹除快潜水舱中的水,否则负浮力作用时间过长,艇下潜速度过快,可能造成失控,影响安全操舵。应急下潜过程中,升降舵的使用与正常下潜基本相同,但要注意快潜水舱造成的负浮力影响。

d. 急上浮。直接用高压气吹除全部主压载水舱中的水,潜艇快速上浮至水面状态。应急上浮只有在危及潜艇安全时才使用,而且在大深度直接全部吹除时,还可能有横向倾覆的危险。因此,一般先用艉舵或吹除艏组水舱水使艇体具有较大纵倾后,才能吹除其他压载水舱中的压载水,并控制好上浮速度,随时注意横倾变化,必要时还应暂停供气。

无向上的弯曲段，以保证检测口的压力变化与潜艇深度变化一致，并消除通海管路中的气体。

3) 纵倾角传感器。纵倾传感器是深度自动舵的另一主要测量部件，用以测量和发送潜艇纵倾角，一般是利用摆锤总是指向地心的原理，将摆杆轴与角位移变换器的转子轴机械固联，而艇体（传感器壳体）与角位移变换器的定子机械固联，当潜艇产生纵倾时，角位移变换器的转子与定子之间产生相对角位移，并变为电信号，分别发送到操纵台和运算放大器，进行显示和参与艏、艉舵角指令的运算。

由于纵倾传感器的工作原理是利用重力指向地心的原理，潜艇强机动和摇摆时的加速度也会引起摆锤偏移引起误差，所以一般也希望尽量安装在潜艇重心附近，以减小摇摆而造成的误差。

在新型深度自动操舵仪中，有的采用了依靠惯性原理制成的倾角传感器（如水平仪），体积小，也有的深度自动操舵仪直接与导航系统联网，由导航系统提供纵、横倾角信号。

4) 运算放大器。运算放大器是深度自动操舵仪的信号处理中心，承担输入信号的调理、综合、运算及放大任务，并输出艏、艉舵控制指令。运算放大器由电子线路和集成模块构成独立部件，一般采用壁挂防水式安装在主操纵台附近，有的深度自动舵将此部件安装在操纵台内。

5) 艏、艉舵执行机构。也称艏、艉舵伺服机构，与航向自动操舵仪一样，分别接收艏、艉运算放大器的电控信号，分别控制艏、艉舵机的转舵方向，一般是电液伺服阀或电液比例阀或电磁换向阀等。因此，与艏、艉运算放大器之间是电连接，与艏、艉舵机之间是液压连接。

6) 艏、艉舵反馈机构。或称艏、艉舵反馈装置，分别与艏、艉舵轴机械相连，将实际艏、艉舵角变换为电信号，分别送至艏、艉舵运算放大器与艏、艉舵指令舵角信号进行比较，保证实际艏、艉舵叶停在指令位置，同时也将实际舵角以自整角发送器的形式发送至操纵台进行复示。

7) 积分机构。用于对深度和纵倾偏差进行积分，积分信号送至艏、艉运算放大器，叠加到艏、艉舵角指令信号中，以消除常值偏航力矩造成的深度和纵倾偏差。有的潜艇对深度自动操舵仪只要求深度稳定精度，对固定纵倾角要求不严，或可以通过移水方式平衡，所以只在艏舵控制信号中增加深度积分信号，而无纵倾积分信号。积分机构作为单独部件出现时，一般由伺服电机和大减速比减速器构成，目前多数自动操舵仪中积分机构已被电子线路所代替。

8) 舵角复示器。用于复示实际艏、艉舵角，一般是接收艏、艉舵角反馈机构发送来的电信号，或分别将舵角复示器中的艏、艉自整角接收机与艏、艉舵角反馈机构中的发送器构成电同步传动，由接收机带动指针进行指示。常采用壁挂式，放置在需要观察舵角的位置（如机电长工作台）。

9) 电源变压器。将舰电源变为深度舵所需电源。由于深度舵所用微电机一般为 400Hz/110V，而舰电一般为 400Hz/220V，所示要通过变压器降压；电源变压器的另一用途是将自动操舵仪电源与其他设备进行隔离。在同时装有航向和深度自动操舵仪的潜艇上，有时合用一台电源变压器。

10) 艏、艉舵机。潜艇舵机一般有两种类型，一种是泵控舵机，由电控变量泵和推舵液压缸构成；另一种是阀控舵机，由电液比例换向阀（或伺服阀）和推舵液压缸构成。用得最多的是阀控舵机，其基本工作原理如图 7.5-21 所示。

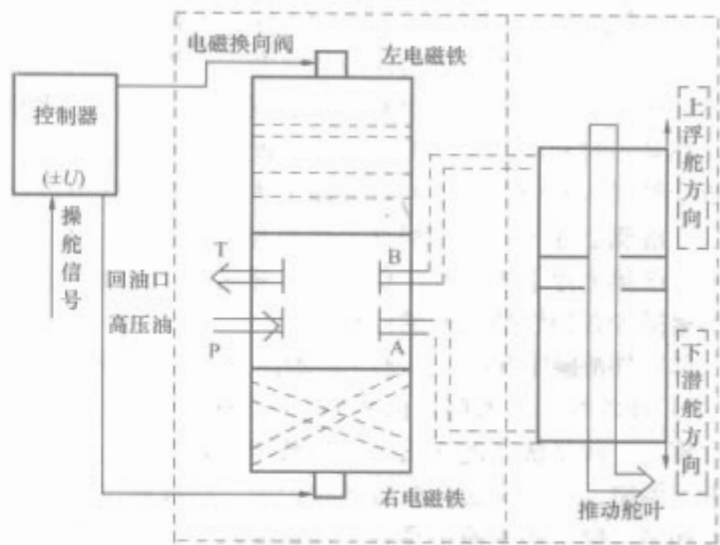


图 7.5-21 阀控水平舵机的工作原理

当舵角信号输入控制器后，按信号的符号向电磁换向阀的两电磁铁之一通电，如 U 为“+”时，左电磁铁通电，阀心下移，开口大小与电压值成正比，高压油由 P 口进入，从 A 口输出至液缸下腔，向上浮方向转舵，液缸上端的液压油通过 B 口到 T 口回油箱，转舵速度与开口大小成正比，反之，如 U 为“-”，右电磁铁通电，阀心上移，开口大小与电压值成正比，高压油由 P 口进入，从 B 口输出至液缸上腔，推动液缸向下潜方向转舵，下端的液压油通过 A 口到 T 口回油箱，转舵速度与开口大小成正比。

3.4 均衡控制系统设计

(1) 均衡指标。

1) 均衡的起动灵敏度。剩余浮力： $\times\times\times\times L$ （排、注水量）；剩余纵倾力矩： $\times\times\times\times L$ （首、尾移水量）。

2) 下潜深度 $\times\times m$ 、航速 $\times kn mile$ 、潜艇进行等速直线定深航行，对 $\times\times t$ 剩余浮力和 $\times\times\times L$ （压水量）剩余力矩进行自动均衡时，纵倾平衡系统和浮力调整系统启动次数不超过 \times 次，总时间不大于 $\times\times min$ 。

3) 随动移水误差不大于规定值。纵倾平衡水仓水量指示误差不大于 $\times\times\%$ ；浮力调整水仓水量指示误差不大于 $\times\times\%$ 。

(2) 实际应用的控制方法。均衡系统主要由浮力调整系统和纵倾平衡系统原理两部分组成。系统原理如图 7.5-22 和图 7.5-23 所示。为了达到均衡状态，可分别采用手动、电动、随动、自动等多种方法进行浮力调整和纵倾平衡调

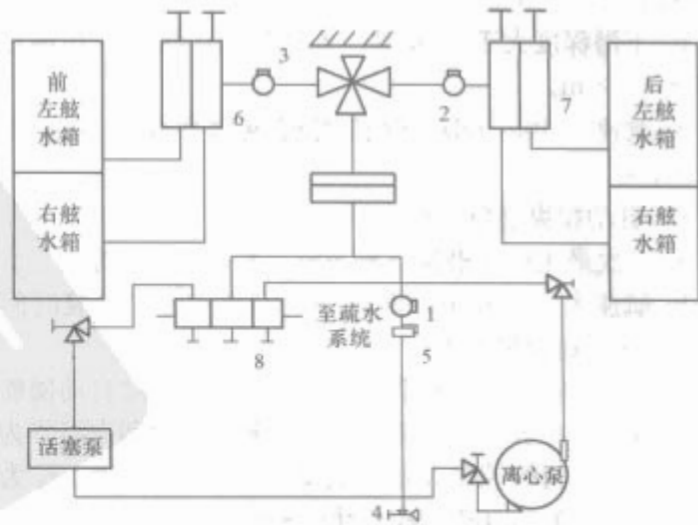


图 7.5-22 浮力调整系统原理图

1、2、3—电控液球阀；4—注排水舷侧阀；
5—自动调压阀；6、7—双联阀箱；8—三联阀箱

整,以使潜艇处于均衡状态,为潜艇的上浮或下潜作准备。如将操作方式开关置于手动工作方式时,操作者可用手扳动排、注水阀进行移水,扳动均衡阀进行纵倾平衡移水,这是在系统无电或无液压状态下的应急操纵方式之一。其他的如电动、随动、自动等工作方式,都由电控或放大器及微处理机进行控制。

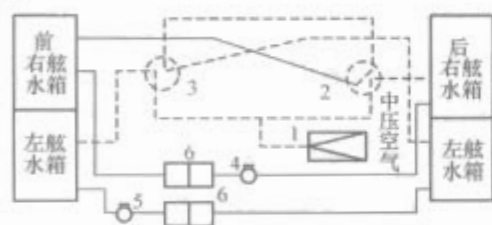


图 7.5-23 纵倾平衡系统原理图
1—自动空气减压气器; 2、3—空气四通旋塞;
4、5—电控液压球阀; 6—双向流量计

3.5 深度舵与联合舵产品

3.5.1 潜艇深度自动舵

从第二次世界大战至今,各工业大国都在花巨资研发常规潜艇和核动力潜艇,同时在对潜艇的控制的深度自动舵也已日趋成熟,并在深度自动舵的基础上,大量研发了集中控制操舵系统。由于现代潜艇对深度自动操舵仪的要求主要是作战任务和提高生命力的需要,即①高速空间机动;②无纵倾定深旋回;③按预定空间轨迹航行;④近海底航行;⑤近冰层航行;⑥无航速定深和变深;⑦危险状态下(出现卡舵、破损、大纵倾时)的自动抗沉操纵;⑧错误操作或设备出故障时的自动监控和保护;⑨低噪声航行;⑩发射导弹武器时的航向、深度和姿态角控制等。

上述工作状态下的自动控制,已不可能由原来简单的深度自动操舵仪和航向自动操舵仪来完成。因此,现代潜艇的航向和深度自动控制需要与其他设备或系统联合工作,组成统一的潜艇集中控制系统。

3.5.2 常规操纵面潜艇的自动操舵系统

3.5.2.1 潜艇操纵集中控制系统

早在 20 世纪 60 年代初,美国就开始了沙比克系统的研究和试验,包括了航速控制、导弹补重、方向舵和升降舵控制、悬浮控制、压载控制以及均衡控制等,是一套完整的潜艇操纵控制中心,其操纵控制系统结构如图 7.5-24 所示。

在该控制台上可实现下列控制:

1) 下潜和上浮控制。通过对主压载水的注入或吹除,控制潜艇进行水上或水下航行工况的转换。

2) 深度和航向控制。通过手动、半自动、自动等操舵方式,控制潜艇在水下按要求的航向和深度航行。

3) 均衡系统的控制。通过向浮力调整水舱注(或排)水的控制,进行剩余浮力调整,通过移置艏、艉平衡水舱中压载水,进行纵倾平衡控制。

4) 导弹补重控制。为了用补重、操舵协调控制潜艇,引入了下列信号:

预计发射数量及顺序;导弹舱盖的开关状态;导弹出筒时刻;补重舱的吹除控制;下一发将发射哪一枚;导弹发射时的潜艇运动参数。

5) 航速控制。发送航速指令(或车令)。

3.5.2.2 集中控制台的设计特点

1) 信息集中处理。采用了中央数据处理器,用于信息采集和处理;航向和深度自动控制指令的解算;自动均衡计

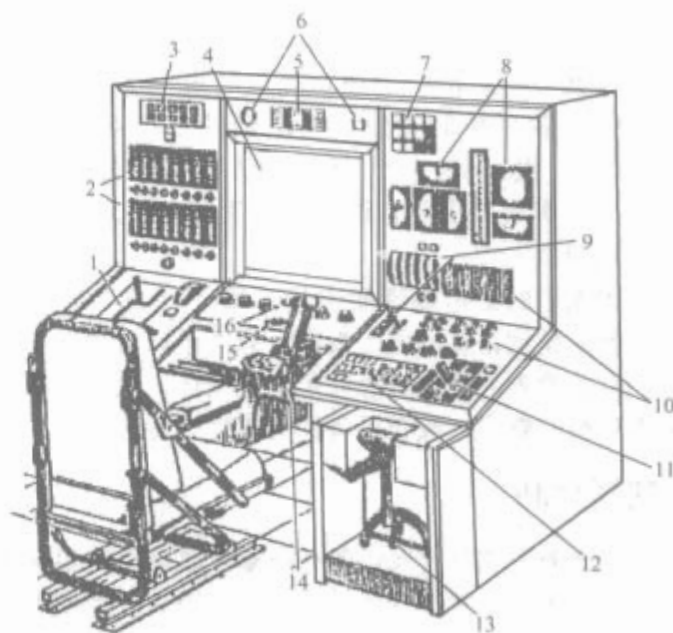


图 7.5-24 美国 20 世纪 60 年代初的潜艇操纵控制系统结构

1—速度控制器; 2—导弹补重控制面板; 3—艇体开口指示器;
4—潜艇快速响应显示器; 5—操纵方式工况指示器; 6—警报器;
7—数字读数器; 8—应急显示; 9—悬浮控制器; 10—纵倾控制器;
11—压载控制器; 12—自动船控控制器; 13—垂直舵应急控制器;
14—辅助船控控制器; 15—通信控制器; 16—电视方位控制器

算,并控制移、注(或排)水;航速发令;发射导弹时的程控补重。

2) 能够进行单人操纵。在各种功能集中起来的基础上,一个人能够完成正常情况下的各项操纵。

3) 能够提供所需的专用装置。如传感器、控制器等。

4) 考虑了多种操纵方式。为了安全系数设计了下列操纵方式:主操纵(完全自动);辅助操纵(手动控制);应急操纵(用辅助的动力系统进行手动控制)。

5) 对操纵员的要求。设计者特别说明,操纵本系统的人员是普通水兵,但需具有潜艇军官和主值班员一样的技能和地位。

3.5.2.3 设计两种综合显示器

为了实施手动控制和监视自动控制,该机构还研制了两种具有综合功能的显示器:

1) 快速响应显示器(SQUIRE)。设计快速响应显示器的中心思想是:以往艇员操艇时,是通过仪表观察当时的潜艇状态,由操作者根据自己对操纵效果的判断进行操舵,其操纵品质决定于个人水平和当时的注意力。快速响应显示器是通过潜艇运动参数的运算,在屏幕显示器上连续预报操纵效果,并向操作者提出参考指令,使操作员能预知潜艇变化和如何操作,故称为快速响应显示器。

用跟踪方式操艇时,当给定新的指令航向和深度后,坐标的原点值代表指令航向和深度。计算机自动解算出能保证潜艇进行最佳机动(最快或最平稳)的参考指令航向舵角和升降舵角,将复杂的操纵变为简单的位置跟踪。

2) 道路显示界。由于潜艇水下航行时艇员人员看不见外界情况,完全依靠众多的仪表和感觉来操纵,俗称盲目操纵,或称靠仪表操纵,易疲劳和误操,为此研制了道路显示器。这种显示器给操作者以虚拟的道路感觉,好像操纵潜艇在天花板与地板之间的道路上航行一样。

3.5.2.4 潜艇集中控制系统的应用

美国最先开始研究,但后来的报导不多,从艇员数量上看,并无大的变化,潜艇上所装备的操纵控制系统仍为

两个战位。但是这一研究成果却为世界各国新一代潜艇操纵控制系统奠定了基础,在以后,以法国为代表的英国、意大利等西方各国都研制成功类似的集“车、舵、水”控制于一体的集中控制系统,如法国的PIC系统及其改进型,早在20世纪80年代就开始装备了阿哥斯塔、红宝石、蓝宝石等各型潜艇,而且设计思想由手动、自动兼顾转变为以自动为主。

美国先进的狼鱼级潜艇大量采用了自动化集中控制技术,其操纵控制设备的先进性和可靠性设计上超过了英、法等国,可见原先的保守思想有了重大变化,也可能是现代潜艇战术思想的要求,或者设备的可靠性已得到保证。

4 减摇控制

船舶在海上航行时发生各种海难事故,以船舶受恶劣气候及大风浪影响而急剧横摇导致船舶海损甚至倾覆沉没为最多。在我国发生的一些海损海难事故就可见一般。一艘5000TEU集装箱船,在海上遇飓风,船舶横摇超过 30° ,巨大的横摇力使400只集装箱倾入大海,直接经济赔偿损失高达5000多万美元。一艘5000t滚装船大舜号在渤海湾遭遇风浪后,船舶加剧摇摆,巨大的横摇力使船沉没,造成严重的经济损失和人员伤亡。

在军事领域,舰艇剧烈的横摇运动,会严重影响战斗力的发挥和舰员的战斗生活条件。例如,剧烈的横摇会严重影响火炮、导弹的命中率,舰载飞机的起落会受到很大限制。另外,舰艇横摇引起舰员身体不适,行动不便,影响工作效率,战斗力削弱。

安装用于降低船舶摇摆的减摇装置,可以明显降低由横摇导致翻船的危险性。同时,船舶摇摆角每减少 1° ,船舶阻尼摇摆力就要相应减少 $0.5\%\sim 0.9\%$,可显著降低能量损耗。因此,减摇装置对提高船舶航行安全性、降低能耗、保证舰艇的战斗能力,具有重要的现实意义。

4.1 减摇控制原理

4.1.1 常用减摇装置

(1) 阻摇舵。船的横摇主要由风、浪等干扰力产生,而转舵产生的舵力也能产生横摇。舵力一般较小,但由于舵叶一般安装在船体尾部的下方,距船体重心远,转舵力矩很大。舵叶至中心的水平距离形成的力矩使船产生转向运动,舵叶至中心的垂直距离形成的力矩则使船产生向转舵方向的横倾(内倾)。船舶转向时的回转运动还将产生一个离心力,这个力使得船向转舵反向横倾(外倾)。在船转向初期,因重心轨迹的曲率半径很大,故离心力与舵的横倾力相比很小,船向内倾,当船稳定转向时,离心力远大于舵的横倾力,船外倾且倾角较大。若在持续转向时突然操反舵,使舵力反向,离心力与舵力同向,会产生更大的横倾角。舵阻摇就是巧妙利用舵所产生的横倾来抵消由风、浪等外力产生的横倾。

舵阻摇装置与减摇鳍相比具有许多优点,如全寿命周期耗费低,重量轻,稳定性高,无需额外设备,占用空间少等,因此,在许多国家受到了不同程度的重视。但是用舵阻摇需要有较大的转舵速度才能有阻摇效果,一般为 $5^\circ\sim 20^\circ/\text{s}$,因此要求舵机的功率足够大。此外,船速低时舵阻摇效果差。

(2) 减摇鳍。减摇鳍是一种主动式横摇减摇装置,它根据现代仿生学原理,通过控制鳍的运动,使鳍产生抵抗海浪的稳定力矩,达到减摇的目的。

减摇鳍一般分为收放式和不可收放式两种。前者又分为伸缩式和转入式。当减摇鳍不工作时,鳍收进船体,而后者不管工作与否总是伸出船体的。安装减摇鳍最理想的位置是船舯的舭部,它是唯一可以安装不可收放鳍的地方,可以使鳍限制在船舶外框线内。

减摇鳍是世界上应用最多的减摇装置。在所有减摇装置中,减摇鳍的减摇效果最好,其减摇效果可达 $70\%\sim 90\%$,并且可以在整个周期内减摇。它占用船内空间较小,尤其是不可收放式减摇鳍。另外减摇鳍基本不影响船舶的初稳性。其主要不足是减摇效果受航速限制,在零航速下没有减摇能力,因此主要应用于中高速航行的船舶。

4.1.2 减摇鳍减摇原理

减摇鳍是一种主动减摇装置,其控制系统一般由控制部分、随动系统以及鳍机械组合体组成,如图7.5-25所示。

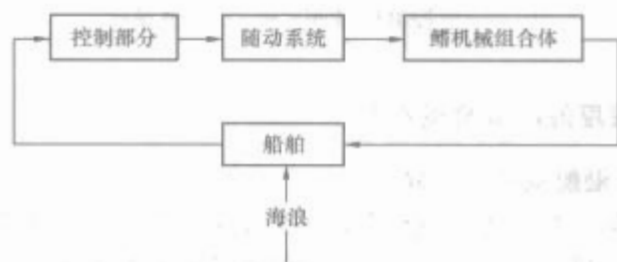


图 7.5-25 减摇鳍的系统组成

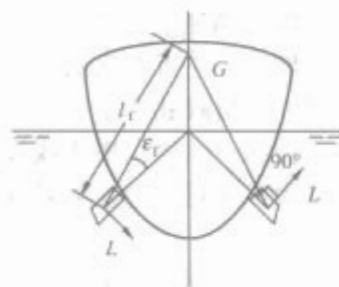


图 7.5-26 减摇鳍力学原理

减摇鳍的鳍由船体两舷伸出船体,安装于水线下的某一深度处,其外形和舵相似,如图7.5-26所示。

当船在风浪中航行产生横摇运动时,控制系统控制鳍随着海浪扰动变化作相应的转动。设转动的鳍角为 α_f ,此时在鳍上产生的升力

$$F = \frac{1}{2} \rho A_F C_L U^2 \quad (7.5-14)$$

式中: A_F 为鳍的投影面积; C_L 为鳍升力系数; ρ 为海水密度; U 为船速。

升力的作用线垂直于水流相对速度和鳍的轴线。由于鳍的布置左右对称,当一舷的鳍向上旋转产生向上的升力,则另一舷的鳍向下旋转产生向下的升力,左右鳍产生的升力相对横摇轴的力矩(稳定力矩)为

$$M_f = 2F l_f \cos \epsilon_f \quad (7.5-15)$$

式中: ϵ_f 为鳍轴轴线与鳍中心至船重心连线间的夹角; l_f 为升力力臂。通常 ϵ_f 很小,式(7.5-15)可近似写成

$$M_f = 2P l_f \quad (7.5-16)$$

控制系统通过调整鳍角 α_f 来控制升力 F ,并产生相应的稳定力矩 M_f 抵消海浪力矩,达到船舶减摇的目的。

4.1.3 减摇鳍控制系统组成

减摇鳍控制技术发展迅速,先后经历了简单控制、比例控制、PID控制、最优控制、自适应控制、神经网络控制等发展历程,其中伴随着模糊理论、变结构理论、鲁棒理论的交叉应用。

减摇鳍减摇控制系统的一般由控制信号测量元件、前置放大器、控制器、随动系统以及航速灵敏度调节器、浪级灵

敏度调节器等辅助部分组成。减摇鳍控制系统结构如图 7.5-27 所示。



图 7.5-27 减摇鳍系统结构

4.1.3.1 控制信号测量元件

主要为角速度陀螺仪（测量横摇角速度），此外还有角度陀螺仪（测量横摇角）以及最新减摇鳍控制系统采用的加速度计（测量横摇角加速度，经一次积分和二次积分分别得到横摇角速度和横摇角）。

4.1.3.2 放大器

放大器用于对测量元件输出信号进行放大，以驱动下级器件。它需和测量元件配合使用。

4.1.3.3 控制器

减摇鳍控制器用来实现减摇鳍控制系统不同的减摇规律，其性能好坏直接影响减摇效果。减摇鳍控制器可分为强电控制和弱电控制两部分。强电控制部分用于控制减摇鳍装置各泵组的起动与停止、控制液压系统的电磁换向阀，接通或断开减摇鳍工作信号以及整个系统的安全保护与故障报警；弱电控制部分用于将传感器测量信号转变为电信号，并经放大、滤波、校正处理后，经液压系统中的电液伺服阀控制，实现功率放大，驱动减摇鳍产生扶正力矩，实现船舶减摇。

控制技术不断进步，减摇鳍装置控制系统也在不断改进。强电控制系统由原来的单一泵组控制发展到现在的整个装置的集中控制和程序控制；弱电控制从电子管放大器、晶体管放大器、运算放大器发展到计算机控制。控制器的另一变化体现在控制信号上，它从早期单一的横摇角控制发展到横摇角速度、角度、角加速度信号组合控制。

控制方法上，现有多数减摇鳍采用力矩的比例—积分—微分（PID）控制。其设计简单，维护方便。其不足为参数整定困难，由于船舶的自然横摇周期和无因次横摇阻尼存在不确定性，需要在海试阶段调整 PID 控制器参数。为解决这一问题，发展了以现代控制理论为基础的最优控制和自适应控制等形式。

4.1.3.4 航速灵敏度调节器

鳍上所产生的扶正力矩与攻角、航速的平方成正比。对于角度反馈减摇鳍系统，扶正力矩与攻角成线性关系，横摇相同时，鳍产生的扶正力矩只和鳍转角有关。实际上，鳍转角指令是在设计航速下给出的。当航速提高时，鳍产生的扶正力矩增大，系统开环增益也增大，系统稳定性降低，而且由于转鳍力矩增大，随动系统的功率可能达不到要求而无法驱动鳍转动。为使不同航速下鳍产生的最大升力不变，需要采取一定措施限制系统开环增益，对不同的航速调整最大鳍角，使鳍产生的最大扶正力矩保持在设计值。航速灵敏度调节器就是根据以上原理设计的。根据鳍的水动力特性，航速很小时减摇能力很差，所以规定航速小于 6n mile/h 时鳍角为零。为避免 6n mile/h 航速附近鳍频繁运动，规定当航速超过 8n mile/h 才起动减摇鳍工作。在航速高于设计值处于 18~30n mile/h 范围时，最大鳍角近似与航速平方成反比。综合上述要求，航速调节器的调节规律为

$$\beta_{\max}(v) = \begin{cases} 0 & v < 6 \text{ n mile/h} \\ \beta_{m0} & 6 \text{ n mile/h} < v < v_0 \\ \beta_{m0} \frac{v_0^2}{v^2} & v > v_0 \end{cases} \quad (7.5-17)$$

式中： v_0 为设计航速； v 为实际航速； β_{m0} 为设计航速下的最大鳍角。

4.1.3.5 浪级灵敏度调节器

由于失速角的存在，减摇鳍的最大工作鳍角是有一定限度的。随着海浪增大，船舶横摇加剧，减摇鳍鳍角会出现饱和，此时减摇鳍工作于非线性状态，减摇效果下降，同时也加剧了机械装置的磨损。为使恶劣海况下减摇鳍仍工作在线性工况，设计一个随海况变化的变增益放大器，以调节控制器对干扰的灵敏度。当海况变差时，增益自动降低，减少鳍角饱和的可能性。

浪级灵敏度调节器通过在线调整控制权系数来实现。由于鳍角幅值随浪级增大而增大，因此当浪级大时，控制权因子增加，以加强对鳍角的衰减，使鳍角的饱和率不超过规定指标；而浪级较小时，控制权因子减少，以减弱对鳍角的衰减，以充分利用鳍容量。一般的角度反馈减摇鳍系统在设计浪级灵敏度调节器时，将其并入 PID 控制器中综合考虑。

4.1.3.6 随动系统

随动系统接收控制信号，完成信号的功率放大，驱动鳍运动，使鳍角准确跟踪控制信号。其基本要求是快速、准确、稳定。目前大多数减摇鳍的随动系统都是电—液随动系统。其原理结构如图 7.5-28 所示。

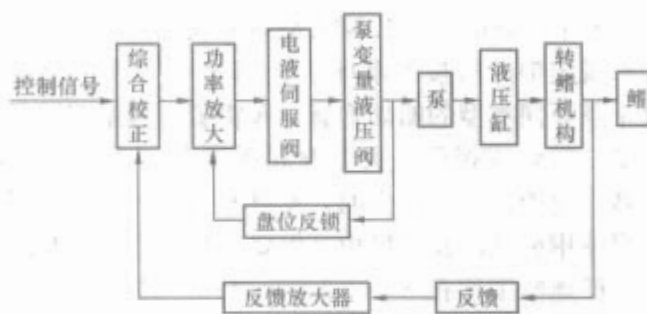


图 7.5-28 随动系统结构

随动系统工作原理如下。灵敏度调节器输出的电压送入综合放大器，与鳍角反馈电压和局部反馈电压代数求和，再经主放大器调制放大，送入液压传动器中的两相异步电动机控制绕组。液压传动器和液压缸组成一个容积式调速系统，它根据信号大小，使鳍以一定速度转动，带动旋转变压器输出鳍角反馈电压，被送回综合放大器输入端与输入信号比较。差值为零时鳍停止转动，从而实现鳍角随动。液压传动器中的两相异步电动机带动测速发电机，其输出电压也送到综合放大器，用以提高随动系统品质。液压传动器由直流拖动电动机驱动。鳍角限位装置用于对鳍角限位，液压传动器带动的止动器用于鳍不工作时可靠地回到零位。

4.1.3.7 鳍

鳍的水动力特性许多方面和舵相似。中小型舰船多使用不可收放鳍。鳍剖面为对称翼型，平面形状一般是矩形或梯形。鳍的翼型应具有大升力、小阻力、压力分布均匀的特性。高速船舶上的鳍可能产生空泡，导致升力下降，压力中心后移，因此鳍剖面的厚度在满足强度要求情况下尽量薄，以抑制空泡的发生和发展。

4.2 船舶减摇主要产品

(1) 减摇鳍。目前海军船舶上的有代表性的减摇鳍装置 MV-100 型装置。其控制机组是由 Muirhead Vactric 公司提

供的,其鳍和液压系统是由 Brown Brothers 公司生产的。装备该型减摇鳍装置的舰船有:新西兰的绿色和平组织护卫舰、英国 4000t 级的 23 型导弹护卫舰和美国 4000t 级的 FFG-7 型护卫舰。特别是 FFG-7 级导弹护卫舰减摇鳍装置的问世,使减摇鳍装置的发展进入了一个崭新的阶段。该装置具有全新的结构和设计思想,其主要特点是:采用可靠性设计、冗余技术,使系统具有很高的可靠性、可维修性和支持性。控制系统采用微机数字化技术,在系统中加入了自动增益调整功能。

(2) 舵阻摇。世界上有多个国家如瑞典、美国、德国、荷兰等开发了舵阻摇产品。美国第一代模拟控制舵阻摇系统应用于海岸护卫队 WECH Hamilton 级巡逻艇,减摇率 30%~40%;1987 年,第二代数字控制器结合改进的舵机系统,使减摇率达到 70%。1977~1986 年,美国主要将 RRD 用于巡逻艇,此后扩展至驱逐舰,减摇率达到 40% (RMS)。国内研究舵阻摇起步于 20 世纪 80 年代,主要围绕军舰展开。将多种控制算法如 PID 控制、自适应控制、最优控制、滑模控制、 H_{∞} 鲁棒控制、自适应神经模糊推理系统 (ANFIS)、结合模糊控制、神经网络与遗传算法的混合智能控制应用到舵阻摇研究中。受限于试验条件,国内研究基本上停留在数字仿真阶段。

下面以瑞典 SSPA Maritime Consulting 公司研制的 ROLL-NIX 减摇系统、德国和荷兰多家公司联合研制的 ASSA 舵阻摇自适应操舵仪为例介绍其主要产品。

1) ROLL-NIX 减摇系统。1984 年瑞典 SSPA Maritime Consulting 开始研制 ROLL-NIX 减摇系统,并于 20 世纪 90 年代初形成定型产品投入市场。至 1990 年,在世界各地已经有数十条不同类型的船如炮艇、布雷艇、海岸巡逻艇、海难救助船、后勤支援舰、大型渡轮等安装了 Roll-Nix 舵阻摇控制器。应用在扫雷艇上时,减摇率接近 60%。Roll-Nix 设计成可使用标准的操舵机构,但要求在两个舵机泵同时启动后最大舵速能工作在 $3^{\circ}/s \sim 10^{\circ}/s$ 之间。其组成如图 7.5-29 所示。图中黑框部分即为 Roll-Nix 控制器。它包括自适应 Kalman 滤波器、自适应航向保持自动舵、高增益转向调节器和自适应阻摇调节器四部分。航向和航速以及横摇角速度信号分别由罗经、计程仪以及速率陀螺提供。



图 7.5-29 舵阻摇系统框图

2) ASSA 舵阻摇自适应操舵仪。德国 B+V Industrietechnik GmbH、荷兰 Imtech Marine & Offshore BV 和德国的 Becker Marine System 公司 20 世纪 90 年代中期联合研制生产了具有阻摇功能的自适应自动操舵仪 (ASSA) (Adaptive Steering and Stabilizing Autopilot),如图 7.5-30 所示。该自动舵轴承采用 KSR 技术支持,专为减摇设计了 SIMPLEX-COMPACT 旋转叶片操纵齿轮。1992 年装备于荷兰皇家海军 M 级护卫舰上进行海试,在恶劣海况下 ASSA 减摇率达到 60%,且航向控制仍然满足规范。1999~2002 年

间,此 RRS 系统装备了 3 艘德国 F124 级护卫舰和 4 艘荷兰 LCF 级护卫舰,2004 装备于德国 K130 轻型巡洋舰,2005 年装备于韩国 Aegis-class KDX III 驱逐舰。

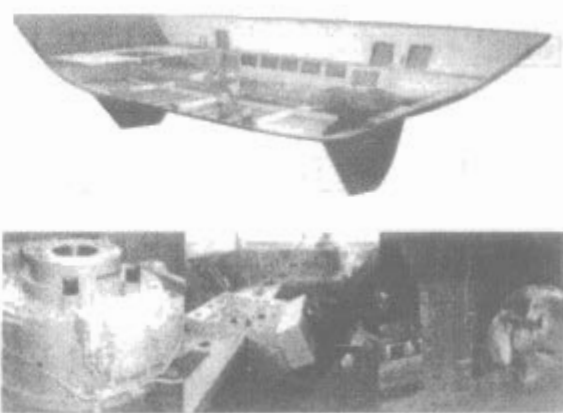


图 7.5-30 有阻摇功能的自适应操舵仪

5 避碰

5.1 船舶避碰简介

船舶间一旦发生碰撞事故,不仅给人民生命造成重大伤亡,使国家财产遭到严重损失,而且在政治上亦带来了不良影响。因此,船舶避碰是一个亟需研究和解决的课题。船舶避碰系统的研究既包含雷达、ARPA、AIS 等避碰系统的开发及应用,也包含了避碰法规、避碰几何、避碰行动、避碰行为以及避碰数学模型等理论研究。制定避碰规则与强化交通管理,加速船舶避碰自动化的研究与开发将是未来避碰研究的主要工作。

(1) 国际海上避碰规则。制订《国际海上避碰规则》(以下简称《规则》),是为了预防海上船舶(包括水面水上飞机)间的碰撞,并为处理船舶间的碰撞事故提供法律依据。它是国际间公认的共同规则。

国际航海组织先后于 1889 年、1910 年、1929 年、1948 年、1960、1972 年召开会议,制定、修改了国际海上避碰规则。目前国际通用的国际海上避碰规则为《1972 年国际海上避碰规则》。1981 年 11 月 19 日在政府间海事协商组织第 12 届大会上又以 A464 (x11) 决议通过了《1972 年国际海上避碰规则修正案》,修正后的 1972 年《规则》于 1983 年 6 月 1 日生效,我国已接受该修正案,但对非机动船作了如下保留:“属于中华人民共和国的非机动船不受国际海上避碰规则的约束”。1972 年《规则》基本反映了现代海运状况,如雷达的普遍运用,船舶的高速化、大型化等;并考虑了通航密度影响航行安全的具体情况,如分道通航制等,对船舶避碰具有积极的指导意义。

《规则》全文共分五章和四个附录。

第一章:总则,阐明了《规则》适用范围、责任以及《规则》中一些专用名词及其定义。

第二章:驾驶和航行规则,分三节,“船舶在任何能见度情况下的行动准则”提出了在任何能见度情况下船舶正确避让的行动规则。“船舶在互见中的行动规则”将船舶在互见情况下各种会遇局面给出了明确定义与避让责任,规定了不同种类船舶航行时的相互间避让责任,明确了互见中船舶间的避让责任关系及避让动作。“船舶在能见度不良时的行动准则”概括了在能见度不良时的行动准则。

第三章:号灯和号型,规定了各种号灯和号型的规格、标准以及对各类船舶在各种动态时应显示号灯、号型的要求。

第四章：声响和灯光信号，规定了船舶在互见中的操纵和警告声号以及船舶在能见度不良时行动和停泊的声号（雾号）。

第五章：豁免。针对在1972年《规则》生效前已造好的或正处在建造的船舶，只要符合1960年《规则》要求则可在不同的方面得到永久豁免或有年限的豁免。

附录：包括号灯和号型的位置和技术细节、在相互邻近处捕鱼的渔船的额外信号、声号器具的技术细节、遇险信号等四部分内容。

由于船舶相遇的情况十分复杂，其过程又是不断变化的，因此《规则》明确指出，任何措施都要适合当时的环境和情况，在条件许可下，应积极地及早采取避让措施，并注意运用良好的船艺。

(2) 避碰研究发展历程。20世纪五六十年代，西方一些发达国家开始对避碰规则中的一些定性概念进行定量研究，先后提出了两船会遇时最小通过距离 DCPA (Distance of Close Point of Approaching)、两船最小会遇点时间 TCPA (Time of Close Point of Approaching)、船舶领域 (Domain)、动界 (Arena) 等概念，并试图用经典数学工具建立船舶避碰数学模型，从而借助计算机设计自动避碰系统。这种方法在许多问题上取得了可喜成绩，但由于船舶避碰与驾驶员的经验和心理等人的因素密切相关，用经典数学工具很难模拟人脑的思维过程，因此这方面的研究尚无完善的成果。

随着控制论、信息论、系统论、决策论特别是智能技术的发展，人们开始试图采用这些新的知识和方法来研究避碰自动化问题。20世纪80年代末，日本东京商船大学、英国利物浦工业大学率先应用专家系统来解决自动避碰问题。随后，德国、美国也先后推出各自研究的避碰专家系统。我国于20世纪70年代末开始避碰专家系统研究，当时主要是理论上的研究，模型建立仍采用经典数学，因些未能很好地解决问题。到了20世纪90年代，我国开始进行自动避碰系统的研制，并取得了初步的成果，但目前多数处于实验研究阶段。

5.2 避碰系统工作原理

5.2.1 简要工作原理

目前所研制的船舶自动避碰系统主要有两种：船舶避碰专家系统和船舶自动避碰系统。船舶避碰专家系统是目前研究较多的一种，其建构方法就是利用人工智能的研究成果构建系统，系统由数据库、知识库、推理机等组成，核心部分是避碰知识库。船舶自动避碰系统一般也以避碰规则为基础，利用微分对策理论中的定性微分对策作为决策算法构建系统。

船舶的安全航行与避碰与人、船舶、环境这三个要素有关，避碰系统是由人一船舶—环境三要素组成的复杂系统。避碰的一般过程如图7.5-31所示，通常包括以下六个方面：发现来船，收集信息；判断有无碰撞危险；确定避碰方案；避让；复核；复航。其中，前两部分是避碰信息的收集和处理阶段，其余四部分是避碰行动的决策阶段。避碰信息的收集和处理主要由 ARPA、AIS 等设备完成，避碰决策由智能专家决策系统完成，避碰方案的执行由舵来完成。

5.2.2 船舶智能避碰专家系统

专家系统是基于知识的智能系统，主要包括：知识库、数据库、推理机、知识获取机制、解释机制和人机接口等模块。专家系统的设计方法为知识+推理=系统。图7.5-32为专家系统的基本结构，其中知识库和推理机是目前大多数

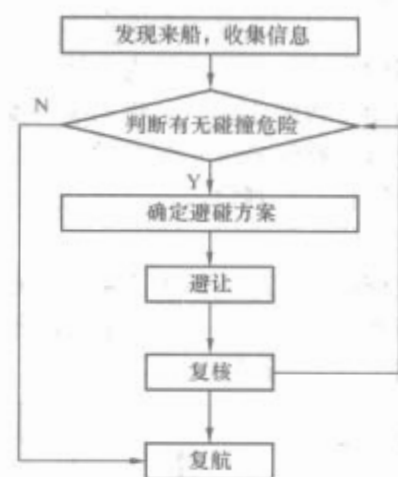


图 7.5-31 船舶避碰的一般过程

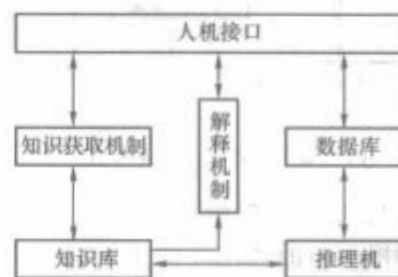


图 7.5-32 专家系统的基本结构

专家系统的主要内容，知识获取机制、解释机制和专门的人机接口还有待深入研究。

(1) 避碰知识库。用以存放驾驶员避碰决策知识，包括与领域相关的书本知识、常识性知识以及专家凭经验得到的试探性知识。知识来源主要有：①《1972年国际海上避碰规则》；②船长、航海专家和海事法专业人员对这些规则的理解和解释；③船舶驾驶员对海上避碰操作经验的总结；④专家、学者、船长及海事法庭对碰撞案例判决的解释；⑤有关良好船艺的运用；⑥对他船及本船避碰行动、避碰效果等的统计分析结果。知识库中知识的数量是专家系统性能的关键。

(2) 动态数据库。用于存放各种会遇船舶的运动信息，即问题求解的初始数据、求解状态、中间结果、假设、目标以及最终求解结果。

(3) 推理机。在一定控制策略下针对数据库中的问题信息，识别和选取知识库中相应知识进行推理，并修改数据库直至得出问题的最终求解结果。

根据动态数据库的来船信息求解中间结果，如避碰危险度和会遇格局，然后根据这些综合信息来搜索知识库，直至找出满意解。推理机实际上是一组利用知识对问题进行求解的控制程序，它模拟人的思维，在控制现场获取现场知识与使用知识进行推理。根据数据库所提供的原始数据，推理机应具有如下功能：①分析会遇局面；②确定避碰时机和避碰方案；③描述目标船避碰危险度；④确定避让危险目标；⑤建立动态事实库；⑥避碰方案推理优化；⑦确定复航时机、方式及幅度。

(4) 知识获取机制。在专家系统的知识库建造中，用以部分代替知识工程师进行专门知识的自动获取，实现专家系统的自学习，不断完善知识库。

(5) 解释机制。回答用户提问，对系统得出结论的求解过程或系统的当前状态提供说明，使非专家用户能够理解系统的求解，使专家和知识工程师易于发现和定位知识库中的错误。

(6) 人机接口。将专家和用户的输入信息翻译成系统可

接受的内部形式,同时把系统或专家向用户的输出信息转换为人类易于理解的形式。具体功能为,接收船舶航行时的相关信息数据并向动态数据库传送,将系统的推理结果(即避碰决策)翻译成容易理解的形式向船舶驾驶员输出,对全自动系统,则直接转化为控制信号传至自动舵;用于对避碰知识库的维护与修改。

按专家系统理论构建的船舶智能避碰专家系统,除人机接口、避碰知识库、推理机外,还包括船舶运动状态模拟。系统结构图如图 7.5-33 所示。

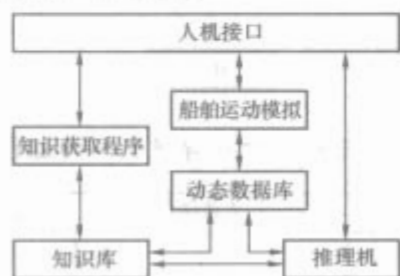


图 7.5-33 船舶智能避碰专家系统结构

船舶运动模拟可以根据操纵运动模拟当前本船运动情况,并对用户的操纵及时作出反应。避碰专家系统在给出避让决策后,船舶操纵运动模块对避让决策进行检验,如可行则直接控制自动舵进行操纵;如不行,则返回专家系统重新搜索或由船长根据当时情况自行决定。检测模块的加入能提高专家决策的有效性,避免由于错误的决定而导致灾难性的后果。

5.3 避碰系统产品

目前国内外典型避碰系统主要有自动雷达标绘仪 ARPA、船舶自动识别系统 AIS 以及各国正在研究和开发的船舶智能专家避碰系统。船舶智能专家避碰系统是今后的发展方向,也是船舶自动避碰系统的发展趋势。

(1) 自动雷达标绘仪 (ARPA)。自动雷达标绘仪 (Automatic Radar Plotting Aids) 简称 ARPA。ARPA 能同时对多个物标跟踪和处理,能自动得到与相遇船间有无碰撞危险的信息或警报,并能对现时和发展中的碰撞局面从显示器上获得全面的判断。对有碰撞危险的来船,值班人员可在 ARPA 上作避让行动的模拟操纵,在取得安全避让数据后再作实际避让。

ARPA 的型号很多,不少国家仍在研制新的高效能的 ARPA。本节介绍三种不同型号的 ARPA。

1) 避碰标雷达。避碰标雷达可以不用作图直接从荧光屏上看出与来船会遇的情况。避碰标是 1in 长的连续显示电子线,一般有五个避碰标可同时使用。有 3、6、12n mile 三个量程。每个避碰标的端点有一个亮点,可以定位荧光屏上任一回波,避碰标亮点延伸指向本船。将一个避碰标压在一个目标船的回波上,如回波沿避碰标线向本船接近,则说明有碰撞危险。

2) 数据雷达。数据雷达是以船用雷达、陀螺罗经和计程仪信号为基础的计算机避碰系统。该系统利用船用雷达但并不影响其功能和操作。

在计算机控制下,数据雷达荧光屏显示船用雷达视频信号,以及直线(矢量)、方块、三角、十字和圆等相关符号。直线(矢量)表示被跟踪目标的速度和方向,方块表示引起警报的目标,三角表示矢量被抑制的被跟踪的目标,十字表示开始跟踪而矢量尚未出现的目标,圆表示需要精确测定的跟踪目标,如最近会遇距离 DCPA 和到最近会遇点的时间 TCPA。

当对选择目标开始跟踪时,该目标将以十字标出,这时计算机便通过接口装置从船用雷达收集目标信息,由计算机算出目标运动数据,并在数据显示器上显示目标真航向和速度、目标 DCPA 和 TCPA、目标距离和方位等数据。荧光屏上显示目标速度矢量,矢量长度有 6、12、18、24 和 30min 的长度供选择,矢量有真矢量和相对矢量两种图像。

该系统可同时处理和跟踪 24 个目标,当目标在设定 DCPA 和 TCPA 内通过时发出警报。显示方式有真运动或相对运动,北向上或船首向上,真矢量或相对矢量。若将这些显示方式配合起来可有八种不同的显示图像。

在采取对危险目标避让之前,驾驶员可模拟其所预想的操纵方案,设定模拟操纵时间,然后开动按钮便可得出左转或右转的模拟情况,只要按钮处于启动状态就将操纵航向每次两度地改变,显示器上的图像也将随之变动。模拟中,若模拟碰撞警报开始闪光,则表示在该模拟形势中有一个目标提供了碰撞警报。当碰撞信号全部消失时,即可得到操纵的航向并显示在数字显示器上。

3) 斯伯利 (CASII) 自动避碰系统。该系统基于本船速度不变且目标保持航向和速度的假设,自动计算本船与各目标发生碰撞的地点,以及本船与碰撞点之间的碰撞航向。系统显示一碰撞点,并将其作为由各个目标开始的一个真矢量的端点,同时用一个包括碰撞点的危险区域来标出可能碰撞的危险范围。危险范围由驾驶员设定的最近会遇距离 (DCPA) 和系统测量、计算误差所确定。危险区域的形状对运动目标一般为椭圆形,对静止目标则为圆形。避开椭圆区域即是安全的,如果本船航向和一个椭圆相交或与碰撞点相交时,前者带有碰撞危险因素,而后者就有碰撞危险。本船右舷前方的目标位于碰撞航向上,左舷前方的目标将在驾驶员设定的最近会遇距离内通过,因此驾驶员必须果断选择不与椭圆相交的航向以避免碰撞危险。

该系统由计算机不断分析目标数据并自动修正显示情况,因此需要两项操作,即选择跟踪目标和输入预相的最近会遇距离 (DCPA)。同时该系统还有一系列报警装置,警告来自跟踪目标的碰撞危险,当重新设定 DCPA 时,任何新的目标进入 DCPA 限界内时都会报警。

避碰显示器上可重叠显示海图数据,如航道或浅滩资料,为驾驶员提供进一步的避碰航行资料。

(2) 船舶自动识别系统 (AIS)。通用船载自动识别系统 (Automatic Identify System, AIS) 的主要功能是将船舶的标识信息、位置信息、运动参数和航行状态等与船舶航行安全有关的重要数据,通过 VHF 数据链路,广播给周围的船舶,以实现对本海区船舶的识别和监视,它采用的是 TDMA 通信方式。

AIS 主要由通信模块、信息收集模块、信息处理模块和信息显示模块组成。系统主要功能有:①能接受和处理船舶静态、动态及与航行安全有关的信息;②能在无人介入的情况下自主、连续地向外发出信息并接受他船的信息;③能对传输的数据和接受的数据进行检错,并且有内置测试系统 (BITE);④能提供国际海事标准界面,并具有人工输入和所取数据的功能。

(3) 船舶智能专家避碰系统。

1) 日本东京商船大学研制的避碰专家决策系统。日本东京商船大学研制并在沙路丸训练船上装备了避碰专家决策系统。该系统主要由他船模拟系统、避碰航线表示系统、避碰专家系统避让计划系统和自动标绘系统等五部分组成。系统对存在避碰危险的目标具有避碰航线选择、计划及设定功

能,并能显示所获得的最优避碰航线。它不仅给出避碰决策,还能通过避碰决策自动控制船舶的车舵等装置。

该系统的优点是:①为全自动避碰决策系统,明显优于咨询式决策系统;②是一种避碰航线选择系统,即根据本船和他船的运动参数,对可能采取的各种避让航线进行评价,能够在一定指标下时限避碰航线最优;③具有齐全的画面和数据显示功能。

该系统的缺点是:①评价本船将采取的最优避碰航向时,未考虑国际海上避碰规则对避碰行动是“大幅度”的要求,也未考虑如何防止或解决船舶间可能发生的避碰行动不协调问题;②在确定船舶避碰危险度时,采取的是围绕本船的圆形,存在偏差;③在确定船舶基本会遇局面时,只考虑接近、同向航行、对遇和交叉四种情形;④避碰方案中,系统采取选择航线而不是确定基本避碰行动,存在局限;⑤在复杂多船会遇时会产生多种避碰方案选择。

虽然存在以上不足,但该系统在自动避碰研究中占据重要地位,大大推动了船舶避碰专家系统的研究和发展。

2) 英国利物浦工业大学研制的避碰专家系统。英国利物浦工业大学研制的船舶避碰专家系统是一种咨询式避碰知识库。知识主要来源于《1972年国际海上避碰规则》,船员、航海专家和海事法院专家对上述规则的解释和良好船艺的实际应用等三方面。通过归纳,提出了两船间六种特定的会遇类型,若存在几种避碰行动方案时,则根据方案的优劣进行排序,同时采取启发式搜索确定最佳避碰行动方案。

该专家系统存在的不足为:①在复杂情况下避碰专家系统得到的结果若与驾驶员所习惯的避碰方式不同,可能会导致驾驶员思想上的混乱,从而丧失采取避碰行动失去最佳时机或诱导驾驶员采取错误的避碰行动;②对复杂的多船会遇局面,避碰决策系统无法给出避碰行动决策,只能由驾驶员自己根据局面进行处理;③由于对同种船舶会遇局面存在多种避碰行动方案,评价每一方案优劣的标准难以确定。

3) 海军兵种指挥学院研制的避碰专家系统。每军兵种指挥学院研制的避碰专家系统也是一种咨询式避碰决策系统。该系统将船舶间的会遇局面分为对遇、右交叉、左交叉、左边追越、右边追越和被追越等六种。基本避让方案有定向、定速、右让、左让、右让减速、左让减速、变速和紧迫行动七种。知识表示采取产生式规则,知识库采取启发式搜索策略。避碰危险度根据目标 DCPA、TCPA、方位和距离四个要素,并根据模糊综合评判确定;避碰行动时机根据设定的碰撞危险度阈值确定。

该系统的优点是:①具有完善的知识表示和推理功能;②采取了较好的推理策略。

该系统的不足之处是:①知识库还不十分完备,对复杂的多船会遇局面系统无法给出正确的避碰方案;②在考虑船舶碰撞危险度时考虑的因素较少,并且没有考虑对直航船驾驶员心理方面的影响;③只考虑了本船为让路船的情况。

纵观各国船舶避碰专家系统的研究情况,目前主要存在以下问题:①对于船舶碰撞危险度的研究还缺乏多因素考虑,难以反映实际航海中的各种情况;②会遇到分类比较粗,难以反映不同舷角、不同距离避让幅度的合理变化;③避让方案相对较少。在避让范围较小的情况下,会产生找不到合理避让方案的可能;④用于模拟测试或实船测试的局面还过于简单;⑤基本未考虑船舶的机动过程或只作简单分类。

尽管避碰专家系统的研究到目前为止还存在许多困难,但其影响及意义是深远的,避碰专家系统仍是船舶自动避碰

系统的发展方向。

6 动力定位

6.1 动力定位系统原理

6.1.1 系统简介

动力定位系统(Dynamical Positioning),简称 DP 系统,是在有风、浪、流的干扰情况下,不借助锚泊系统,利用自身的推力器系统使船舶保持一定的位置和航向,或者按预定运动轨迹运动的闭环控制系统。

动力定位系统主要应用于海上作业的船舶(如科学考察船、深海救生船、生产油轮、潜水器支持船、平台支持船、管道和电缆敷设船)和海上平台(海洋钻井平台等)的定点系泊,此外还可用于相对 ROV 和潜水器的轨迹控制。相对传统系泊形式(如锚泊系统等),它具有更高的定位精度、更好的灵活性、可变载荷大,可适用于多种海况,船体结构安全,机动性强,可迅速转移作业地点,成本不随水深增加而增加,操作方便,对于海洋开发事业和海军现代化建设的发展均具有重要的意义。

动力定位系统是一种主动式定位控制系统,它通过位置测量系统检测当前船位相对目标船位的偏差,采集环境参数(风、浪、流),计算使船舶恢复到目标位置所需的推力,并对各推力器的推力进行分配,确定各推力器的推进方向、螺距及转速,各推力器产生相应的推力而使船舶(平台)保持设定的航向和船位。DP 系统控制船舶的纵荡、横荡和首摇三个自由度的运动,对横摇、纵摇和垂荡运动不予控制。

6.1.2 系统组成

动力定位系统主要由位置测量系统、控制系统和推力系统三部分组成,其原理框图及各部件连接[挪威 Kongsberg 公司 DP 系统(DP-1 级)]如图 7.5-34 和图 7.5-35 所示。

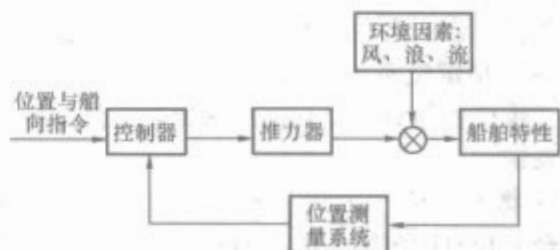


图 7.5-34 动力定位系统框图

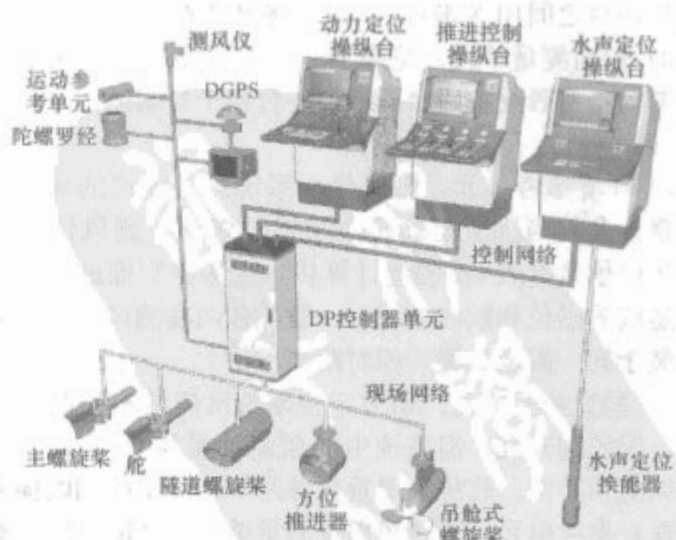


图 7.5-35 动力定位系统各部件连接

(1) 位置测量系统。位置测量系统用于测量船舶或平台相对于某一参考点的位置。完整的位置测量系统由定位参考单元、艏向测量单元、环境参考单元和垂直参照单元组成。

1) 定位参考单元。位置测量系统要求以足够的速度和精度获取所需的信息,以便控制器产生推力指令以抗衡环境干扰。理想的定位参考数据精度应在 0.1~1m 内。各种定位参考单元的选用应根据实际需要而定。主要有水声定位系统、张紧索、差分 GPS 系统、水上微波系统、激光雷达系统 (laser radar) 等,如图 7.5-36 所示。为确保 DP 系统连续正常工作,通常每艘 DP 船上安装三种及以上的定位系统。

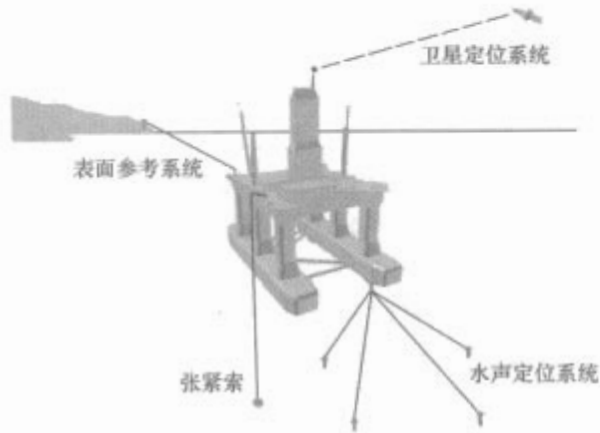


图 7.5-36 位置参考单元

a. 水声定位系统 (hydroacoustic)。将一组发射器或接收器按一定几何图形或基阵布置在船上,也可布置在作为动力定位基准坐标的海底上。前者为短基线系统,后者为长基线系统。系统依靠声信号从发射器经过水传播接受器,然后根据接收到的信号计算出船体的位置。声学系统在较长的一段时间内有比较好的精确度,但会有瞬时或短时间段的干扰。

b. 张紧索 (tautwire)。在船体和海底之间装一根钢索,测量其在恒张力情况下的倾斜度,然后根据船体、钢索以及海底所构成的几何图形求解船体所在的位置。由于流的存在,将会导致张紧索在长时间段的偏移,所以精确度不如声学系统,但张紧索不会受瞬时或短时间段的干扰。

c. 全球卫星定位系统 (GPS)。能全天候、实时、高精度地提供三维位置信息。是目前应用比较广泛、精度也比较高的定位系统。

d. 水上微波系统 (artemis microwave): 用于精确测量船舶 (平台) 相对固定物体的距离和方位。系统分为固定台和移动台两部分。移动台设在被控船舶 (平台) 上,固定台设在海上固定物体上。两个单元具有相似的雷达天线。固定台和移动台之间用 X 波段 (3cm) 微波进行通信。

2) 艏向测量单元。陀螺罗经、电罗经等设备用于测量船的艏向。一般配备两台罗经,一台用于自动舵,一台用于 DP,互为备份。

3) 环境参考单元。测风仪为系统提供连续的风速、风向信息。尤其当船舶已就位于预定位置后,测风仪可将风速、风向信号送入 DP 控制计算机,直接控制推进力以补充风力造成的船位和航向变化。一般配备两套测风仪,其测量头安装于同一高度位置,相对距离尽量大。

4) 垂直参照单元。动力定位系统虽然并不控制船舶的纵摇、横摇与升沉,但系统中的超短基线与 GPS 天线需要进行纵横摇补偿。故需采用垂直参照单元测量船舶纵摇和横摇。垂直参考单元可以采用惯性测量单元 (IMU) 的陀螺和加速度计来实现。

(2) 控制系统。控制系统用于计算保持船位所需的作用力,并对推力系统各推力器进行力的分配。控制系统根据外部环境条件 (风、浪、流) 计算船舶 (平台) 所受的扰动力,然后由扰动力与测量位置,计算保持船位所需的作用

力,即推力系统应产生的合力,并按照推力分配逻辑,将力和力矩指令转换为推力器指令 (转速、转向) 分配给各个推力器。此外,它还实现以下功能:补偿动力定位系统固有的滞后,以免造成不稳定的闭环动作;消除传感器的错误信号,防止推力器做不必要的运转。

(3) 推力器系统。推力器系统用于产生力和力矩,来抗衡作用于船上的干扰力和干扰力矩。推力器包括安装在艏部的主螺旋桨推进器,全向转动螺旋桨、导管螺旋桨和隧道螺旋桨。尾部装有可转向导管螺旋桨装置,用以产生纵向推力和横向推力及力矩,艏部装有侧向推力器,用以产生横向推力及力矩。可调桨、舵机、侧推装置、方位推进装置进行联合调控。

6.2 动力定位系统设计

(1) 性能指标。

- 1) 等级: 1 级、2 级、3 级。
- 2) 动力定位精度: 定点保持状态下, 船位误差 $< \times \times \text{ m}$, 航向误差 $< \times. \times^\circ$ 。
- 3) 控位能力: 流速 $< \times \times \text{ 节}$, 风速 $< \times \times \text{ 节}$ 。
- 4) 功能: 定点保持 (定艏向定点保持、最小能耗定点保持)、航迹跟踪。
- 5) 能耗: 功率 $< \times \times \times \text{ kW}$ 。

(2) 设计步骤。

1) 确定控位能力。船舶动力定位系统的控位能力是指系统达到控制精度允许的最大流速、最大风级。控位能力应根据该船任务需要以及作业海域条件来决定。

2) 确定定位精度。根据海上作业类型、作业海域深度确定。一般的,水深大于 3000m 的海底作业要求定位精度为 30m (垂直偏角 $34'$); 水深 300m 左右海底作业要求的定位精度为 3m。

3) 确定定位等级。国际海事组织 (IMO) 和各船级社根据动力定位系统的功能以及设备冗余度,将动力定位系统分为 1、2、3 三个等级,等级高的 DP 系统采用了冗余技术。一般科学考察船、布缆船、海上平台供应船的动力定位系统可选用较低或中等级别;而海上钻井平台、海上作业多用途工作船由于操作安全性极为重要,可靠性要求非常高,其动力定位系统设计要求有较多冗余,通常需选用较高级别。表 7.5-1 给出了 IMO 规定的动力定位系统等级以及部分国家船级社对应的附加标志。

表 7.5-1 动力定位系统等级及船级社附加标志

船级社	DP 附加标志				
			1 级设备	2 级设备	3 级设备
IMO (国际海事组织)			自动、手动定位控制和艏向控制 (在规定的最严重环境条件下)。2 套计算机系统 (在规定的最严重环境条件下)。无冗余	自动、手动定位控制和艏向控制 (在规定的最严重环境条件下)。2 套计算机系统,当一套发生故障时,另一套可正常工作。有冗余	自动、手动定位控制和艏向控制 (在规定的最严重环境条件下)。2 套计算机系统,当一套发生故障时,另一套可正常工作。至少有一套可正常工作
DNV (挪威)	DYNPOS T	DYNPOS AUTS	DYNPOS AUT	DYNPOS AUTR	DYNPOS AUTRO
ABS (美国)		DPS-0	DPS-1	DPS-2	DPS-3
CCS (中国)			DP-1	DP-2	DP-3

4) 估算辅助推力装置所需功率。根据定位能力以及船舶水上水下侧投影面积,可以估算所需要的侧向推力,然后进一步估算侧推装置所需的功率。

5) 确定辅助推力装置配置方案。根据动力定位系统基本要求以及上述侧向推力的初步估算,可以选用不同形式的侧向推力装置来组成动力定位系统。如艏部设置一台全回转推力装置,艉部设一台侧推器。

6) 估算控位能力。在确定动力定位系统辅助推力装置的配置方案时,必须估算整个系统的动力定位能力是否能达到预期的要求。可采用两种方法,即船模试验法或软件预报法,以确定动力定位所能承受的最大风级和流速。

(3) 控制器设计。船舶运动可分为高频运动和低频运动。由于高频运动仅仅表现为周期性的振荡而不会导致平均位置的变化,而且一阶波浪力数值非常大,推力系统无法平衡抵消。为了避免不必要的能量浪费和推力器的磨损,一般从测量信号中分离出低频信号加以控制,而不对高频信号进行控制。动力定位控制系统一般采用多回路闭环控制,控制器设计包括前馈控制器和反馈控制器。前馈控制器主要是为了快速抵消风力带来的干扰,而反馈控制器则对偏差信号进行负反馈实现定点或跟踪控制。其工作原理如图 7.5-37 所示。

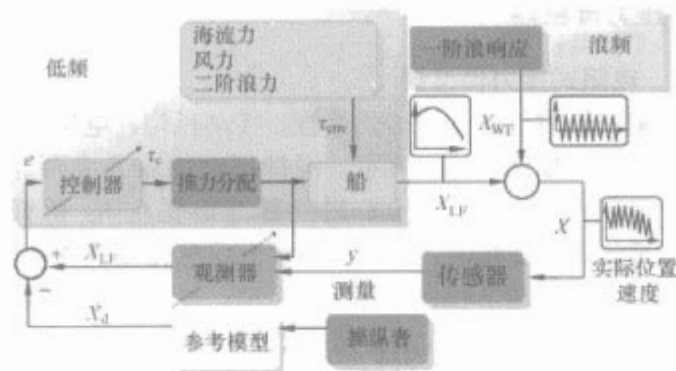


图 7.5-37 动力定位系统控制原理图

对于海浪引起的船舶高频运动,一般采用滤波技术将低频运动和高频运动进行分离。根据不同情况,滤波方法有多种。①死区滤波,如操舵仪设置转舵速度死区;②低通滤波器,适用于特大型船舶;③低通滤波+陷波滤波器,适用于小船,此时船舶低频运动和波浪频运动没有明显界限。④基于卡尔曼滤波的观测器。低通滤波器和陷波滤波器都存在相位滞后问题,影响控制系统的稳定性。而卡尔曼滤波的采样和修正在一个周期内完成,克服了相位滞后问题,并且能进行状态递推,短时间无信号时能保证系统正常工作。

商业化的船舶动力定位系统产品经历了 PID 控制、LQG 控制、自适应控制等几个发展阶段。

6.3 动力定位系统典型产品

世界上第一条装备动力定位系统的船是 1961 年建造成功的 Cuss 1。早期的动力定位系统采用模拟电路控制器。随着计算机技术和传感器技术的发展,动力定位系统逐渐采用计算机控制系统,控制性能和可靠性得到很大的提高。20

世纪 70 年代后期美国海军研制成功 DP 系统,起初主要用于潜艇支持船、军用海底电缆铺设等作业。20 世纪 80 年代初开始,随着北海油田、墨西哥湾油田的大规模开发,动力定位系统被广泛应用于钻探石油、采矿取样、油田守护、支援潜水作业、水下工程施工、海底管线铺设和检修、水下机器人 (ROV) 跟踪等作业。尤其是 20 世纪 90 年代以来,随着海上勘探开发逐步向深水 (500~1500m) 和超深水 (1500m 以上) 发展,几乎所有深水钻井船、油田守护船都装备了动力定位系统。据初步估计,目前全世界装备动力定位系统的各类船只已超过 1000 艘。许多国家的大型船舶公司,如挪威的 Kongsberg Simrad 公司、美国的 Nautronix 公司、法国的 Alstom 公司都开发了动力定位系统产品,此外,英国、荷兰、日本也开发了相关产品。

国内较早就开始研究船舶动力定位技术,建立了船舶动力定位技术联调实验室,并进行了深潜救生艇六自由度动力定位系统的研制。“大洋一号”科学考察船动力定位系统是国内第一艘自行设计增设动力定位系统的大型远洋特种船舶,动力定位系统于 2002 年完成加装。它具有定点控位、水下遥控无人潜器 (ROV) 跟踪以及航迹保持功能。下面介绍目前国际上比较先进、配备量大的两种动力定位系统,即美国 Nautronix 公司的 SAK5002 动力定位系统以及挪威 Kongsberg Simrad 公司的 SDP11 & SJS01 动力定位系统。

(1) SAK5002 动力定位系统。美国诺成海洋技术有限公司 (Nautronix Offshore Technology Inc) 生产的 ASK5002 系统 (DP-2 级),是该公司的第五代动力定位产品,是当今世界上最先进的动力定位系统之一。目前,NAUTRONIX 公司已经研制出更先进的 DP-3,并已在军事等重要领域得到优先应用。ASK5002 动力定位系统的组成为:2 台控制台、2 个信号处理单元、1 套外围设备、1 套测量传感器 (包括:2 个 DGPS 全球卫星定位仪,1 个 MDL 激光定位传感器,2 个电罗经,2 个风速风向仪,1 个垂直信号传感器 VRU,1 个移动信号传感器 MRU)、2 台侧推以及 2 台 SSP 推进器。

推进器状态由控制台来选择。提供了综合手动控制、自动首向控制、自动位置控制、自动区域控制、ROV 跟踪等 14 种控制模式。每一控制方式下可对推进器进行任意组合,其余推进器作为自动补偿用。

(2) 挪威 Kongsberg Simrad 动力定位系统。Kongsberg Simrad SDP11 & SJS01 动力定位系统。其性能指标为:在良好海况下的船位控制误差小于 0.5m,风速 24m/s、浪高 9m、海流 1.5kn mile 条件下的船位控制误差为 3m。

基本构成:主控制单元 (操作控制台) 与各种位置、运动测量装置,以及船舶的动力系统构成了本船的动力定位系统。主要包括:①主控制单元;②差分 GPS,定位精度 1m,速度测量精度 0.1m/s;③气象仪,风速范围 0~65m/s,精度 2%,风向范围 0°~359°,精度 2°;④激光定位,最大测量距离 1000m,测量精度 0.1~0.2m;⑤横摇纵倾传感器,测角范围 ±25°,角速度范围 150°/s,精度 0.01°;⑥单手柄控制系统。

第6章 船舶安全监控系统

1 常用传感器

1.1 温度传感器

常用的温度传感器有热电阻、热电偶和热敏电阻。在船舶上测量温度较低的场合通常采用热电阻或热敏电阻，如测量气缸冷却水温度、润滑油温度、主轴承温度等。

1.1.1 热电阻

热电阻是利用金属材料电阻值随温度升高而增大，且在检测范围内它们之间保持良好线性关系的特性制造的。热电阻常用铜丝或铂丝双线绕在绝缘骨架上，再把它插入保护套内，装在被测的管路或设备中。热电阻式温度传感器由热电阻和测温电桥组成，如图 7.6-1 所示。热电阻 R_t 是测温电桥的一个桥臂，离测温电桥较远。连接热电阻的两根导线的电阻值会随环境温度的变化而变化，这样会引起一定的测量误差。为了减小这一测量误差，在实际测量电路中往往把“两线制”接法改为“三线制”。这时，图中 R_a 和 R_b 不再同属热电阻 R_t 的同一桥臂，而是分属两个相邻的桥臂。这样，当环境温度变化时，这两根导线电阻值的变化可以互相抵消，实现了对环境温度变化的补偿。 R_0 是调零电位器。当测量温度为 0°C 时，调整 R_0 使桥路输出 u_{ab} 为零。

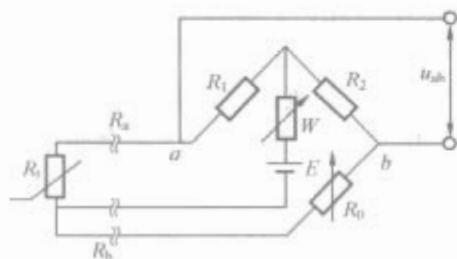


图 7.6-1 热电阻三线连接法

1.1.2 热电偶

在船上测量较低温度的场合，通常采用热电阻式或热敏电阻式温度传感器，如检测气缸冷却水温度、润滑油温度、轴承温度等，量程大致为 $0\sim 150^\circ\text{C}$ 。在检测高温的场合，如排烟温度等，一般都采用热电偶式温度传感器。热电偶是由两根不同的金属导线或半导体材料焊接而成的。焊接端称为热端，与导线连接端称为冷端。热端插在需要测温的地点，冷端置于室温中。若热、冷两端温度不同，在热电偶回路中，会产生热电动势 e 。当冷端温度不变时，其热电动势 e 随热端温度的升高而增大。由于冷端温度是随室温变化的，若热端测量温度不变而室温升高时，则因热、冷端温差减小使热电动势 e 也减小，这就降低了测量的精度。为了消除冷端温度变化对测量精度的影响，一般要采用冷端温度补偿措施。冷端温度补偿的方法很多，这里仅介绍补偿电桥法，如图 7.6-2 所示，其中， R_0 、 R_1 和 R_2 是锰铜丝绕制好的电阻，它们的电阻值基本上不随温度变化； R_{Cu} 是铜丝绕制的补偿电阻，其电阻值随温度升高而增大。温度补偿电桥的输出为 U_{ab} 与热电偶输出的热电动势 e 串联。这时，热电偶传感器输出电压 $u_0 = e - u_{ab}$ 。假定热端温度不变而冷端室温升高，这时热电动势 e 要减小，而桥路中 R_0 、 R_1 、 R_2 电

阻值基本不变， R_{Cu} 要增大，致使 a 点电位升高，故 u_{ab} 下降。由于冷端室温升高后， e 和 u_{ab} 都有所减小，故可维持 u_0 基本不变。

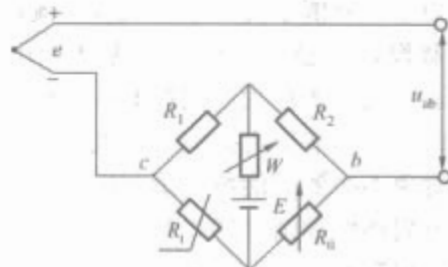


图 7.6-2 热电偶的冷端补偿原理

常用的热电偶有铂铑—铂热电偶，镍铬—镍热电偶。机舱中检测排烟温度常用镍铬—镍型热电偶。

1.2 压力传感器

1.2.1 电阻式压力传感器

电阻式压力传感器是由弹簧管、传动机构、电位器及测量电桥组成。如图 7.6-3 所示。滑针把电位器分成两部分，一部分串联在 R_1 的桥臂上；另一部分串联在 R_3 桥臂上。当所测量的压力变化时，通过弹簧管和位移传动机构使滑针绕轴转动，改变两个相邻桥臂的电阻值，使测量电桥输出的电压信号 U_{ab} 与输入的压力变化成比例。

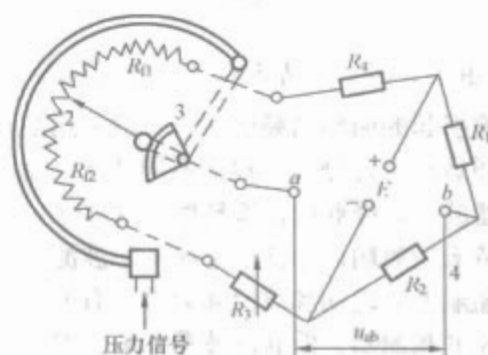


图 7.6-3 电阻式压力传感器原理图

1.2.2 金属应变片式压力传感器

金属应变片是用铜镍或镍铬等金属丝绕制成栅状，用粘结剂贴在基板上，两端焊接镀银或镀锡铜线作为引出线构成的。应变片粘贴在压力传感器的测量部分。应变片具有一定的电阻值，它作为测量电桥的一个桥臂，如图 7.6-4 所示。在测量压力为零时，调整 R_0 的电阻值使电桥处于平衡状态，输出电压 0V 。当测量压力增大时，应变片要弯曲变形，栅状金属丝被拉长使其电阻值增大，电桥失去平衡，并输出一个与测量压力成比例的电压信号。 R_t 为温度补偿电阻。

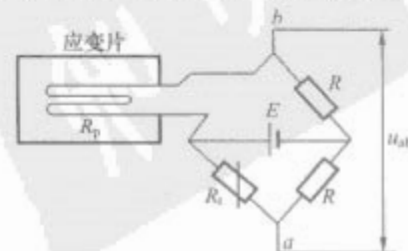


图 7.6-4 金属应变片式压力传感器

1.3 液位传感器

液位传感器种类很多，这里介绍两种。

1.3.1 变浮力液位传感器

变浮力液位传感器原理如图 7.6-5 所示。它由浮筒 1、平衡弹簧 2 和差动变压器 3 组成。当水位变化时，浮筒浸没在水中的体积发生变化，浮筒的浮力也将随之变化。于是浮筒会克服弹簧的张力使铁心在差动变压器中产生位移，这样差动变压器就会输出一个与液位成比例的电信号。

1.3.2 吹气式液位传感器

吹气式液位传感器是属于静压式液位传感器，其结构原理如图 7.6-6 所示，是由过滤减压阀 1、节流阀 2、浮子流量计 6、导压管 7、切换阀 3、安全阀 4 及差压变送器 5 等元件组成。调整节流阀 2 使导压管排气口中有微量气泡逸出。这样导压管 7 中压力始终与液位的静压力相等，即与液位高度成比例，因此，液位变化时，导管内的压力也随之变化，经变送器输出的气压信号就与液位高度成比例。

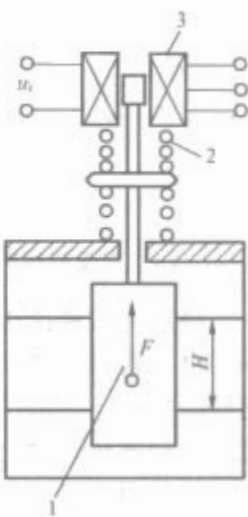


图 7.6-5 变浮力式液位传感器
1—浮筒；2—平衡弹簧；3—差动变压器

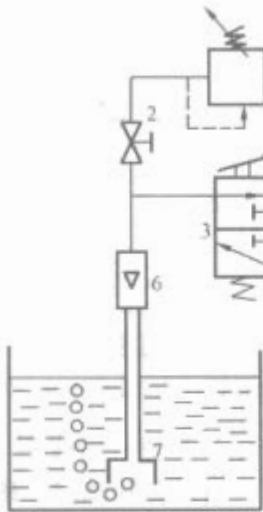


图 7.6-6 吹气式液位传感器原理图
1—过滤减压阀；2—节流阀；3—切换阀；
4—安全阀；5—差压变送器；6—浮子流量计；
7—导压管

1.4 流量传感器

流量传感器有容积式、电磁式等几种。

1.4.1 容积式流量传感器

容积式流量传感器主要用来检测油或水的流量，它由检测齿轮 1、转轴 2、永久磁铁 3 和干簧继电器 4 等部件组成，如图 7.6-7 所示，当流体自下向上流动时，由于存在摩擦力，因此有压力损失，使进口流体压力 p_1 大于出口流体压力 p_2 。检测齿轮在压差作用下产生作用力矩而转动。通过的流量越大，齿轮转速越快。齿轮转动经轴 2 上端的永久磁铁 3 驱动干簧继电器 4 使其触点闭合和断开，从而输出反映流量大小的不同频率的电脉冲信号。

1.4.2 电磁式流量传感器

电磁式流量传感器是根据电磁感应原理来检测流量的。所以只适用于测量导电液体的流量。它主要由一对磁极和检测放大电路组成，其原理如图 7.6-8 所示。一对磁极置于管

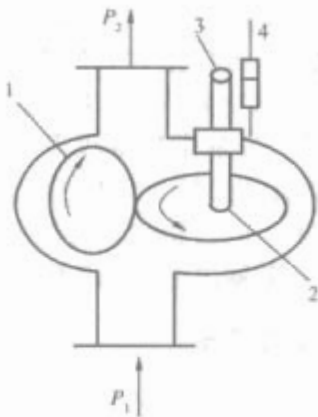


图 7.6-7 容积式流量传感器原理图
1—检测齿轮；2—转轴；3—永久磁铁；
4—干簧继电器

导两侧，用于产生磁场。导电流体在磁场中垂直于磁通方向流动时，切割磁力线，于是在两个电极上产生感应电动势，其电动势的大小与液体的体积流量成比例，感应电动势经放大后输出。

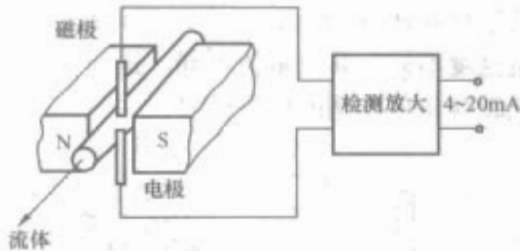


图 7.6-8 磁式流量传感器原理图

1.5 氧含量传感器

氧含量传感器用于检测油船封舱惰性气体中的氧含量。以防止油舱发生爆炸事故。

氧含量传感器是根据氧的顺磁性质工作的，大多数是采用热磁式的。对一般气体来说，由于分子热运动，每个分子磁极的方向是不确定的，且对磁场无反应。唯独氧分子不同，它们遇到磁场作用时，要向磁场里面跑且分子的磁极方向顺着磁场方向有序地排列，这就是氧的顺磁性。图 7.6-9 就是根据氧顺磁性原理制成的热磁式氧含量传感器。它是由检测通道、磁极、电桥及放大电路等组成。检测通道由环形管和水平管组成，水平管上绕有两组铂丝测量电阻 R_1 和 R_2 ，它们与锰铜丝绕制的电阻 R_3 和 R_4 构成一个电桥。 R_0 是调零电位器。在水平管左端置一个磁场。 R_1 和 R_2 被电桥电源加热，使水平管的温度高于两侧环形管的温度。当含有氧气的测量气体进入检测通道时，水平管左端靠近磁场，氧气的磁化率高，而水平管右端的磁化率低，这样水平管左面的氧气进入水平管被加热，因氧的磁化率随温度的升高而降

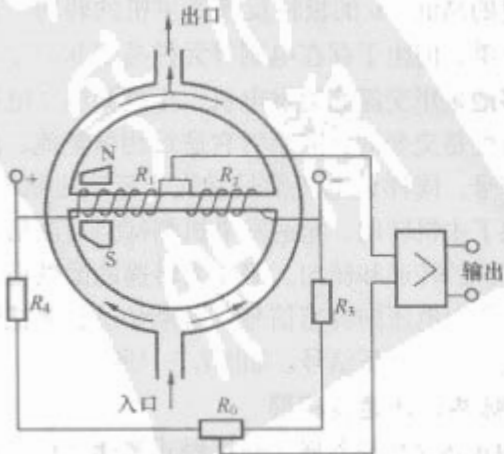


图 7.6-9 热磁式氧含量传感器原理图

低,故进入水平管的氧将被温度较低的氧向右排挤,形成了一个从左向右的磁风,气体中含氧量越多,这个磁风越大。当磁风存在时,它要从电阻 R_1 和 R_2 带走热量,由于冷的气体先经过 R_1 故从 R_1 带走热量较多,使 R_1 的温度比较低,则 R_1 的电阻值比 R_2 小。气体中氧含量越多, R_1 的电阻值比 R_2 小得越多,电桥输出的不平衡电压信号也就越大。经差动放大后,其输出电压也就越大。

1.6 二氧化碳含量传感器

二氧化碳含量传感器主要用于检测锅炉中排烟二氧化碳含量,以监视锅炉的燃烧情况。也可用于检测冷藏舱中二氧化碳含量。船用二氧化碳含量传感器多采用热导式,如图 7.6-10 所示。它是由采样陶瓷过滤器 1、冷却器 2、凝水罐 3、过滤器 4、测量气室 5、标准气室 6、抽气泵 7 及测量电桥等组成。测量气室放置两组铂丝电阻 R_1 和 R_3 。室内有被测气体通过。标准气室内也放置了两组铂丝电阻 R_2 和 R_4 ,内为空气。桥路上的电阻均被电源加热,在常温下,纯空气的导热率大于二氧化碳导热率。由于导热率不同, R_2 和 R_4 经纯空气的散热量比 R_1 和 R_3 经含二氧化碳气体散热量大,则由于电阻温度不同,其电阻值不同。这样,电桥将输出一个与二氧化碳含量成比例的电压信号。

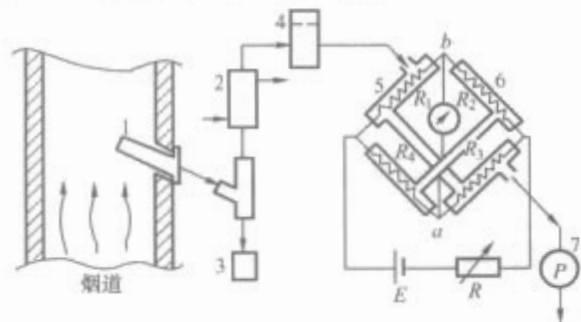


图 7.6-10 热导式二氧化碳含量检测原理图
1—陶瓷过滤器; 2—冷却器; 3—凝水罐; 4—过滤器;
5—测量气室; 6—标准气室; 7—抽气泵

1.7 转速传感器

在机舱中需要检测转速的设备有主机、发电机的原动机及废气透平增压器等。检测主机转速可用测速发电机和磁脉冲传感器。检测发电机原动机及废气透平增压器的转速,由于转速较高,一般常用磁脉冲传感器。

1.7.1 测速发电机

测速发电机是把所测量的转速信号直接用发电机输出的电压信号来表示。测速发电机有直流和交流两种形式。

直流测速发电机输出的直流电压信号 u 与主机转速 n 成比例,即 $u=Kn$ 。式中, K 为比例系数。直流电压 u 的大小反映了主机转速的高低, u 的极性反映了主机的转向。直流测速发电机电路简单,但由于存在电刷等元件易引起故障,故新型的船舶中较多地采用交流测速发电机。交流测速发电机输出的电压信号的极性是交变的,需要对其进行相敏整流、滤波后变成直流电压信号。同样该电压信号的大小反映主机转速的高低,其极性反映了主机转向。测速发电机测得的转速信号被送至转速表指示主机的转速和转向。但作为转速的反馈信号和逻辑信号不能使用负向电压的转速信号,尚须经过整流把倒车负极性电压转变成正极性电压信号,如图 7.6-11 所示。

1.7.2 磁脉冲式转速传感器

磁脉冲式转速传感器属于非接触式测速元件,它没有相对摩擦的运动部件,所以这种传感器使用寿命长、检测精度高。

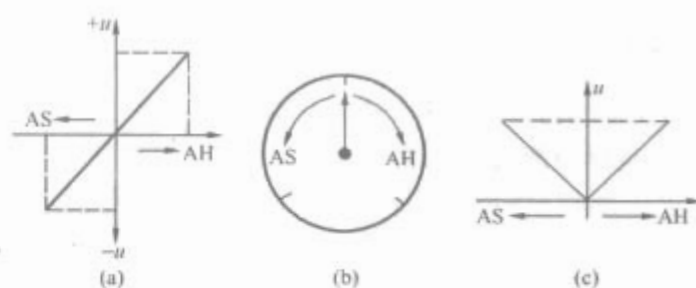


图 7.6-11 直流测速发电机特性

(a) 直流测速特性; (b) 转速表; (c) 转速反馈特性

磁脉冲式转速传感器是由磁头、脉冲整形放大电路、频率—电压转换电路及滤波电路等部件组成。磁头是产生脉冲信号的部件。它产生脉冲信号的频率与转速成比例,在主机的主轴或凸轮轴上装一个齿轮(可利用盘车的齿轮)把磁头对准齿顶固定,磁头与齿顶之间保持一个较小的间隙。当主机转动时,磁头将交替对准齿顶和齿槽,即可输出脉冲信号,磁头的结构原理如图 7.6-12 所示。

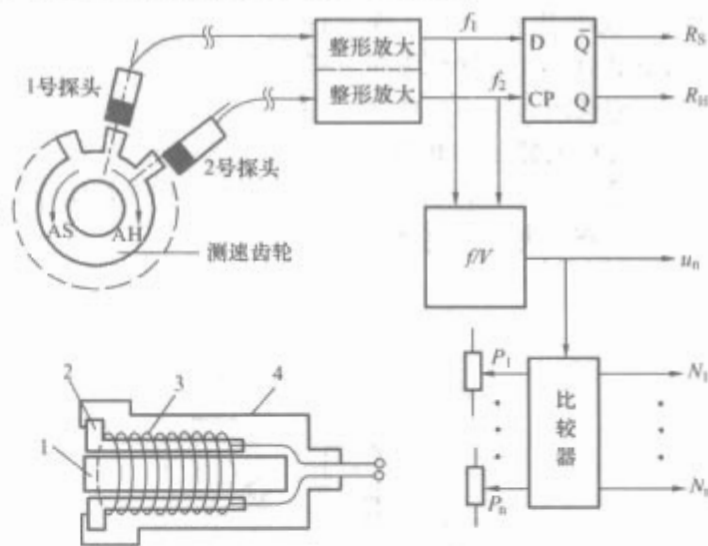


图 7.6-12 磁脉冲测速原理

1—永久磁铁; 2—软磁铁; 3—线圈; 4—外壳

在永久磁铁 1 和软磁铁心 2 上绕一组线圈 3,非导磁外壳 4 对线圈组件起保护作用。当齿轮转动时,磁头对准齿顶和齿槽会交替变化,将引起线圈内磁通的变化,从而在线圈内产生感应电动势。齿轮每转过一个齿,磁探头就产生一个脉冲。磁脉冲探头所产生的脉冲频率可表示为

$$f = zn/60 \quad (7.6-1)$$

式中: f 为脉冲频率; z 为齿轮的齿数; n 为转速。

磁头所得到的感磁电动势的脉冲信号较弱,其波形也不理想,所以要把磁头输出的脉冲信号送入整形放大电路,使其成为较大幅值的矩形波。再把该矩形波送到如图 7.6-12 所示的频率—电压转换器电路中,把它转换成与矩形波频率成比例的直流电压信号来表示主机的转速。

为了检测主机的转向,需要装两个磁脉冲传感器,且它们之间要相差 $1/4$ (或 $3/4$) 个周期。这两个磁头所获得的脉冲信号 f_1 和 f_2 经整形放大后,分别送至 D 触发器的 D 端和时钟脉冲 CP 端,由触发器输出端 Q 的状态来表示主机的转向。当齿轮如图示朝正车方向转动时, D 触发器的 D 端的正脉冲总比 CP 端超前 $1/4$ (或 $3/4$) 个周期,即 CP 端来正脉冲时, D 端总是 1 信号,故触发器 Q 端保持 1 信号,表示主机在正车方向运行,当主机在倒车方向运行时, D 触发器 CP 端正脉冲总是超前 D 端 $1/4$ (或 $3/4$) 个周期,即 CP 端正脉冲到来时刻 D 端必定为 0 信号,所以触发器输出端 Q 保持 0 信号,表示主机在倒车运行。

1.8 扭矩传感器

扭矩传感器用来检测主机的有效功率(轴功率)。它的工作原理是轴的扭矩与轴的扭转角成比例。扭矩传感器有多种结构类型,这里仅介绍一种相位差式扭矩传感器,其原理如图7.6-13所示,在主轴上安装两个齿轮及两个磁脉冲传感器。在主轴扭矩为零时,两个齿轮的齿顶和齿槽由轴线方向看是重合的。当主轴受到扭矩作用时,两个齿轮牙齿要错开,两磁脉冲传感器输出的矩形波就存在相位差,通过检测这个相位差来反映主轴所受扭矩的大小,显然相位差越大,扭矩也就越大。

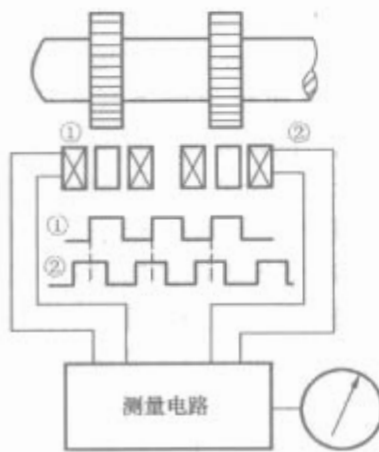


图 7.6-13 相位差式扭矩检测原理

1.9 主机工况监视传感器

为了对主机进行故障诊断和制定检修预报的需要,出现了主机工况监视传感器,有气缸套温度及表面温度检测传感器、气缸套表面磨损检测传感器及活塞环工作情况检测传感器。

1.9.1 活塞环检测传感器

活塞环检测传感器用来监视活塞环工作状态是否正常,其结构原理如图7.6-14所示。实际上,它就是磁脉冲传感器。由于活塞体、活塞环与气缸壁之间的间隙不同,在活塞上、下运动时,传感器线圈中的磁通要发生变化。如果把活塞体通过传感器磁头所产生的电量作为基准,当活塞环状态正常时,通过传感器磁头将产生上跳的波形,如图7.6-15中矩形波所示。如果活塞环卡死在环槽内,则所产生的波形低而小。如图7.6-15中S所示。当活塞环断折缺损时,其波形图如图7.6-15中的M所示,成为凹形波。因此根据波形图特点,可以判断活塞环状态。

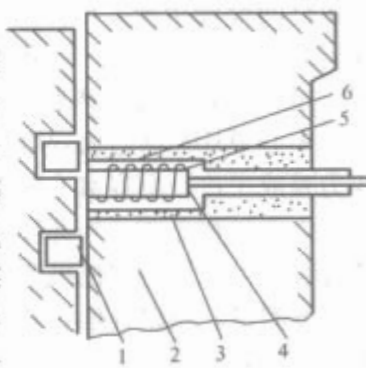


图 7.6-14 活塞环状态监视原理

1—活塞环; 2—气缸套;
3—外壳; 4—铁心;
5—线圈; 6—绝缘层

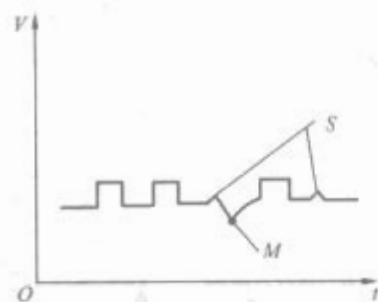


图 7.6-15 活塞环工况波形图

1.9.2 气缸套磨损检测传感器

气缸套磨损监视传感器是由薄膜电阻、参考电阻和壳体组成,如图7.6-16所示。传感器安装在气缸套上,使薄膜电阻随气缸壁一起磨损。薄膜电阻的阻值与其长度成正比,与其导电截面积成反比。即

$$R = r \frac{C}{AL} = r \frac{C}{S} \quad (7.6-2)$$

式中: R 为薄膜电阻的阻值; r 为电阻系数; C 为导电长度; A 为导电截面积的宽; L 为导电面积的长; S 为导电截面积。

在磨损前,薄膜电阻导电面积的长为 L (一般 3mm), 所对应的起始阻值为 R_0 (一般为 500~1000Ω)。随着气缸套的磨损 L 减小, 则导电截面积 S 也减小, 使薄膜电阻的阻值 R 增大。由于, 原长 L 和起始阻值 R_0 为已知常数, 故磨损量 x 与电阻值 R 之间具有一一对应关系, 即 $x = L(1 - \frac{R_0}{R})$, 如图7.6-17所示。因此, 只要测取 R 值大小, 就可得到相应的磨损量 x 。 L 越小, R 越大, 则气缸套磨损越大。

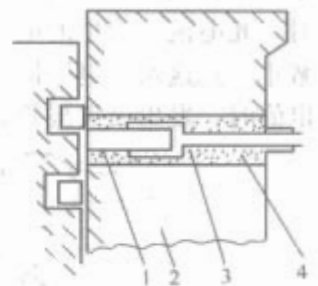


图 7.6-16 气缸套磨损监视传感器
1—薄膜电阻; 2—气缸套;
3—绝缘层; 4—引线

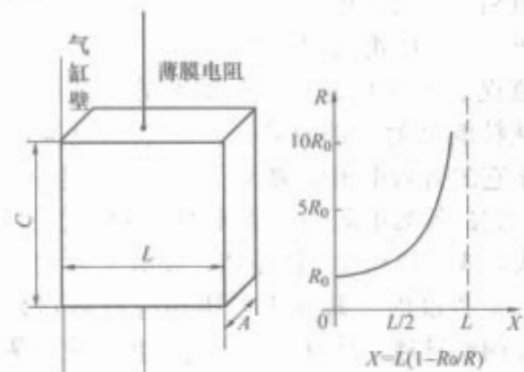


图 7.6-17 薄膜电阻磨损特性

为了避免检测中因温度变化而引起薄膜电阻阻值变化所产生的测量误差, 在传感器中还设置了一个与薄膜电阻类同的参考电阻, 由它来补偿温度变化所产生的误差。

火警探测器是火灾报警的检测单元, 它是根据火灾前兆的物理现象, 即发热、冒烟等制成的不同类型探测器。

1.10 火警探测器

1.10.1 感温式火警探测器

它是利用火灾前兆的热效应制造的, 如图7.6-18所示。图(a)、(b)是属于恒温式火警探测器。火灾前会产生高温(60~80℃), 低熔点金属丝被熔断, 或利用膨胀系数不同的两金属片, 受热变曲使触头断开。它们可使控制的继电器断电, 其常闭触头闭合发出火灾报警信号。图(c)是温升式火警探测器。它利用温度升高的速度(每分钟温升超过 5.5℃)报警。当温度升高较快时, 气室内膨胀的气体来不及从小孔泄出, 其压力升高, 波纹片下弯使动触头与静触点闭合发出报警信号。利用热效应制成的火警探测器一般都是用在监视的舱容较小的地方, 如住舱、走廊、大台等。

1.10.2 感烟管式火警探测器

它是利用火灾前产生烟雾, 且烟雾浓度不同其透光程度不同的原理来检测的, 如图7.6-19所示。抽风机把所监视

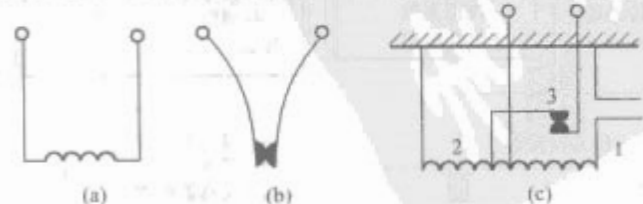


图 7.6-18 感温式火警探测器
(a) 恒温式; (b) 恒温式; (c) 温升式

舱室的气样由集气管1和感烟管2排出。光源3经透镜变成平行光分别照射在光电池4和5上。当气体中烟雾浓度增大时,光电池5产生的电信号不变,而光电池4产生的电信号减小。把这两个电压信号送至放大器6,当两电压差大到一定值时,发出火灾报警信号。

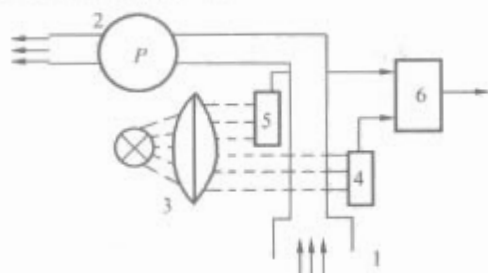


图 7.6-19 感烟管式火警探测器原理图
1—集气管; 2—感烟管; 3—光源;
4、5—光电池; 6—放大器

1.10.3 离子感烟式火警探测器

离子感烟式火警探测器的原理如图 7.6-20 所示。它有内外两个电离室,每个电离室中放一块放射性同位素镅 241 和一个电极。镅 241 能发射 α 射线使空气电离,外电离室有小孔与所监视的舱室相通,当有烟雾的空气进入外电离室时,烟雾颗粒能吸附一部分离子,故达到电极的离子数减少,相当于它的等效电阻值增大。内电离室是纯空气,不允许进烟雾,它的等效电阻与烟雾无关,这样随着舱室内烟雾浓度的增大, A 点电位 u_A 要提高,经放大后输出。当烟雾浓度达到一定程度时,其输出电压相应提高到某一动作电压,触发晶闸管导通,使继电器通电发出火灾报警信号。

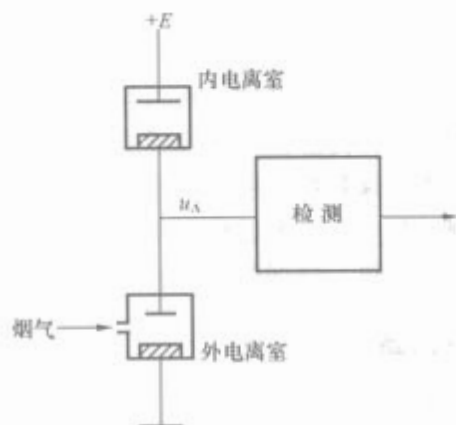


图 7.6-20 离子感应式火警探测器原理图

利用烟雾效应制成的火警探测器都用在监视舱容较大的场合,如监视货舱火警。

1.11 智能压力变送器

根据技术和市场需求发展趋势,国外各大仪表制造商把开发智能产品和发展现场总线技术放在公司技术进步的首

位,采用数字、模拟混合信号的智能现场仪表开始投入市场。某些大公司已终止了常规压力变送器的生产,智能压力变送器发展速度很快,它们的特点既有 4~20mA 的模拟信号,又有数字信号,易被用户所接受。

在产品投放市场的同时,不同国家、不同厂商纷纷组成集团,加紧现场总线标准的制订,发展各自的现场总线标准,以图率先占领市场,在工业自动化领域逐渐形成以 Fisher-Rosemount 和 Honeywell 为首的两大发展趋势,经历一段时间的考虑,两者于 1994 年 10 月合并,成立现场总线基金会 (Fieldbus Foundation),简称 FF。现场总线是一种取代 4~20mA 标准,用于连接智能现场仪表和控制设备的全数字化通信技术。现场总线具有开放性、互操作性,它使一些控制功能下移到现场设备中。目前 100 个以上的国际著名公司都参加了 FF 组织,并按 FF 协议开发智能产品。此外市场上还有 Profibus、CAN 等现场总线标准的产品。由于模拟现场仪表与全数字化智能仪表存在着本质差异,所以要市场接受全数字化智能仪表还需要一定的时间,原投资的保值也会限制全数字系统占领市场的速度,但变送器采用全数字化智能仪表的大趋势已不可逆转。

下面介绍一款 3051C 智能压力(差压)变送器。

3051C 是 Rosemount 公司高性能智能压力变送器系列。该变送器的框图如图 7.6-21 所示,传感器组件结构如图 7.6-22 所示。该系列最高精度为 $\pm 0.075\%$,且有 100:1 的大范围量程比。从图 7.6-21 可见,变送器由传感组件和电子组件两部分组成,电路采用专用集成电路(ASIC)和表面安装技术(SMT),传感器组件选用高精度的电容传感器,过程压力通过隔离膜片及灌充液传送到电容中心膜片上,中心膜片与两边固定电容极板形成一差动电容,与过程压力差成正比。电容室为激光封焊,并在机械、电子和热力上独立于过程介质及外部环境。电容室移到电子罩颈部,远离过程法兰,可达到机械和热力上的隔离。传感组件中增加了温度测量,用以补偿热效应。在变送器的生产过程中,所有传感器要经过压力和温度的循环测试,由此产生正确的温度校正系数,存入传感组件的存储器中。变送器工作时,传感组件将差压转换成数字量,此数字量信息连同传感组件存储器中的校正系数一并送入电子组件模块。电子组件有一块混合 ASIC 和 SMT 的信号板,上面的微处理器对组件的信息进行处理,最后由 D/A 输出 4~20mA 的电流信号。电子组件的另一个重要功能是完成与 DCS 或 275 型 HART 手操通信器的双向数字通信。数字通信使用工业标准 Bell202 频率移动键控(FSK)技术,即在模拟输出直流电流信号上迭加一个 0.5mA 值的双音频信号来完成远程通信。HART 协议可方便完成对 3051C 变送器的组态和测试。3051C 变送器现场接线如图 7.6-23 所示。

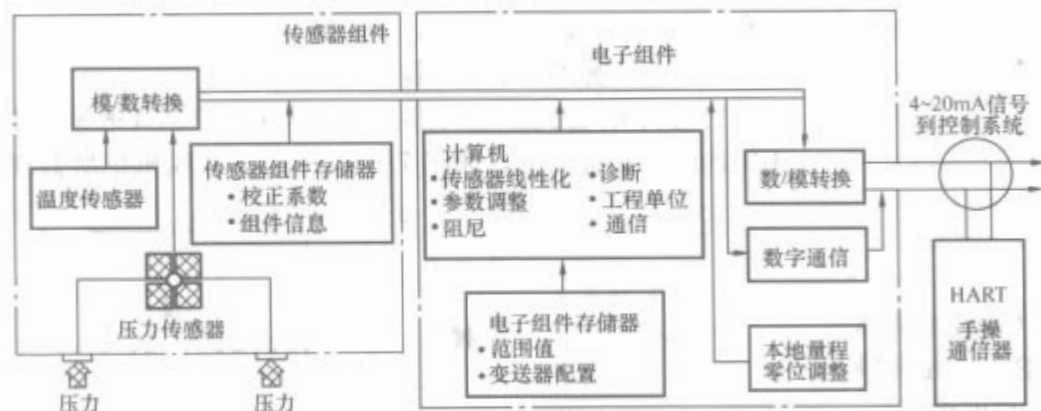


图 7.6-21 3051C 压力变送器框图

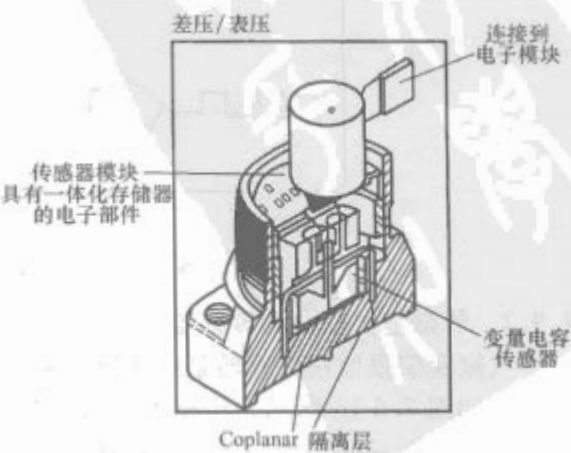


图 7.6-22 传感器组件结构

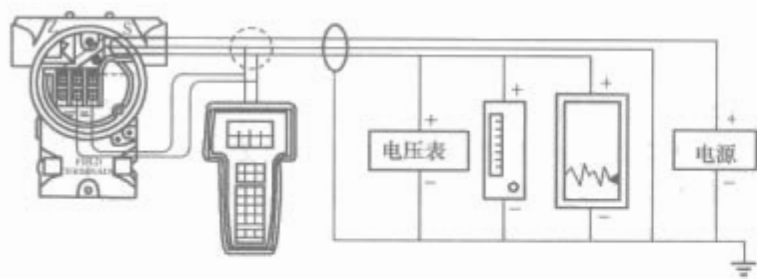


图 7.6-23 变送器现场接线图

2 机舱集中监视与报警系统

机舱集中监视与报警系统是船舶自动化的一个重要组成部分，它能准确、可靠地监测机舱中各种机电设备的运行状态和参数，并进行显示、记录、报警和自动控制。当运行设备发生故障时，系统能自动发出声、光报警信号，并进行报警打印记录。对于无人值班机舱，集中监视与报警系统还能把报警信号延伸到驾驶室、公共场所、轮机长和值班轮机员的住室等。

机舱中各种机电设备的运行状态和参数由各种传感器检测。它向集中监视与报警系统提供被测对象的信息和数据。检测的信息主要有两大类。一类是模拟量信号，如温度、压力、转速、流量、液位、电流、电压、功率、频率等。另一类是开关量信号，如一些设备的运行或停车状态、阀的开或关、压力开关信号、液位开关信号等。这些信号根据不同的要求有的需要数据显示，有的需要进行报警处理。

机舱集中监视与报警系统在发展过程中，其技术水平不断提高。从采用继电器、晶体管分立元件、运算放大器和集成电路的监测报警系统，发展到采用微型计算机的监测报警系统。在进入 20 世纪 90 年代以后，微型计算机在机舱集中监视与报警系统中应用越来越广泛，其功能更强、显示技术更先进。

2.1 机舱集中监视与报警系统的基本功能

(1) 参数采集和显示。由于机舱内机电设备种类繁多，因此，监视与报警系统要对各种类型的参数进行采集处理。采集的信号有模拟量信号和开关量（数字量）信号等。监视与报警系统对这些信号采集处理后，进行多种方式的显示，包括机舱集控室及各终端显示器的显示、模拟灯板显示和延伸报警板显示等。轮机员可以在船上各部位通过这些显示实时掌握和了解机舱设备的运行情况。

(2) 故障报警。设备在运行中发生的故障有两种形式，一种是通常故障；另一种是短时故障。对这两种形式的故障，监测系统分别进行不同的处理和报警。

1) 通常故障报警。当运行设备发生故障时，与其相关的参数越限后，系统立即发出声响警报，同时报警指示灯快速闪烁，以通知值班轮机员。值班轮机员按应答（确认）按钮后，使警报声停止，报警指示灯转换成常亮（平光），以记忆故障状态。直到轮机员排除故障，参数重新恢复正常，报警指示灯才转为熄灭。

2) 短时故障报警。短时故障是指运行设备发生故障时，可借助自动切换装置使备用设备投入运行，其相关的参数在短时内会自行恢复正常，例如某泵发生故障后，能迅速切换到备用泵启动。当短时故障出现时，系统也立即发出声响警报，报警指示灯快速闪烁。但在值班轮机员尚未按应答（确认）按钮时，由于运行设备已自动切换到备用设备，报警指示灯会转换成慢闪烁（如有的系统不设报警指示灯慢闪，则

仍然保持快闪状态），警报声继续，直到值班轮机员按应答按钮后，才使警报声停止，报警指示灯转为熄灭。

3) 排气温度偏差报警。主机气缸排气温度是判断主机故障的一个重要而又敏感的参数，特别是各缸排气温度与平均温度之间的偏差，更能判断出某一缸的状态。因此，监视与报警系统应对主机各缸排气温度的平均值及偏差值进行监测、报警。当平均温度或者偏差温度超过设定值时，不仅要发出报警，还要通过主机遥控系统自动控制主机减速运行。

(3) 打印记录。打印记录包括参数打印记录和故障报警打印记录。参数记录有定时制表记录和随时记录两种方式。定时制表记录是打印机以设定的间隔时间，自动地将机舱内需要记录的全部参数打印制表，轮机人员只要将打印纸整理成册，即可作为轮机日志。随时记录是轮机人员根据需要，随时打印即时工况参数，可进行全点或选点打印监视点的参数。故障报警打印记录是由监视系统自动进行的，当被监视的运行设备发生故障时，立即启动打印机把故障名称、内容和时间打印下来，而在故障排除后，自动打印正常的信息。

(4) 延时报警。在监视液位时，由于船舶摇摆使容器内的液面来回倾斜，而出现短时虚假越限现象，导致系统误报警。在开关量报警监视中，当主机变速经过临界转速区时，船舶会出现剧烈振动，使开关量传感器的触点抖动而出现瞬间断开现象，导致系统误报警。为了避免系统误报警，通常设置延时报警功能，在液位监视报警中，常采用延时 2~30s 的长延时报警，而在开关量报警中，常采用延时 0.5s 的短延时报警。在延时时间之内，参数越限或触点断开不发出报警，超过延时时间若参数仍越限或触点仍断开，系统就发出报警，这样可避免误报警。

(5) 报警闭锁。船舶的运行状态是变化的，如停港期间，船上主机和有些设备不运行，而发电机等仍然需要运行，这时，有些相关参数会超过正常范围。为防止这时的误报警，必须具有报警闭锁功能，根据船舶的运行状态封锁相关的报警点。

(6) 延伸报警。延伸报警是专门为无人值班机舱而设置的，当机舱无人值班时，必须将机舱故障报警信号分组后，延伸到驾驶室、公共场所、轮机长和值班轮机员住室的延伸报警板（屏）。延伸报警通常按故障的严重性分为四组：主机故障自动停车报警；主机故障自动减速报警；重要故障报警；一般故障报警。有时为了简化延伸报警，在值班轮机员住室仅设置重要故障报警和一般故障报警两个报警指示灯。

(7) 值班呼叫。值班呼叫用于轮机员交接班时的信号联络。值班选择开关设在集控室的控制台上，当选择开关转到某值班轮机员位置时，驾驶室、公共场所和该值班轮机员的延伸报警板（屏）上立即发出值班呼叫信号，通知他来接班。该值班轮机员作出应答后，这时值班呼叫声停止，该班轮机员的值班指示灯从闪光转为常亮。此后，监视系统就将故障报警信号延伸到值班轮机员处，其他轮机员处的延伸报警不会有反应。

(8) 失职报警。在机舱无人值班的情况下，监视系统在发生故障报警的同时启动 3min 计时器，若值班轮机员未能在 3min 内及时到达集控室完成消声应答，即使已在延伸报警板（屏）上作出应答操作，仍将被认为是一种失职行为，监视系统就向各延伸报警板（屏）发出失职报警信号，以确保船舶运行安全。发出失职报警后，必须在集控室的控制台按消声按钮，才能撤消失职报警。

(9) 功能试验和自检。功能试验用于检查监视系统的工作是否正常，并在系统发生故障时，可寻找故障的部位。只

要按下功能试验按钮,所有监视点全部进入报警状态,若哪个监视点不进入报警状态,则表示该监视通道有故障。

为了确保监视系统本身工作的可靠性,监视系统都具有自检功能,对一些重要环节,如传感器、闪光灯、电源电压和电源熔丝等进行自动检测,只要其中之一发生故障,监视系统将自动发出系统故障的报警。

2.2 SMS-12 型机舱监测与报警系统

SMS-12 型机舱监测与报警系统是由日本 JRCS 公司设计制造的。在中远集团总公司第五代 5250 箱位的集装箱船上配备了这套系统,该系统是以多微处理器网络技术为基础的分布式监测报警系统,它按标准模块设计,采用串行和局

域网通信,使该系统具有很大的灵活性。

2.2.1 系统的结构

SMS-12 型机舱监测与报警系统的结构框图如图 7.6-24 所示。该系统包括主站、分站和延伸报警板(屏)等部分,并连接在一个网络中。分站就是各个现场单元(或原地单元),它们的处理器板是相同的,可互换,仅是程序不同,程序存放在只读存储器中,是可更换的。主站是由中央计算机、操作面板、彩色显示器、打印机等组成。主站可以配置两套中央计算机系统,分为 A 系统和 B 系统,一套作为主系统可正常运行,另一套作为备用系统。备用系统一直监视主系统的运行工况,当备用系统检测到主系统出现故障时,将自动替换运行中的主系统,并执行其相应的所有功能。

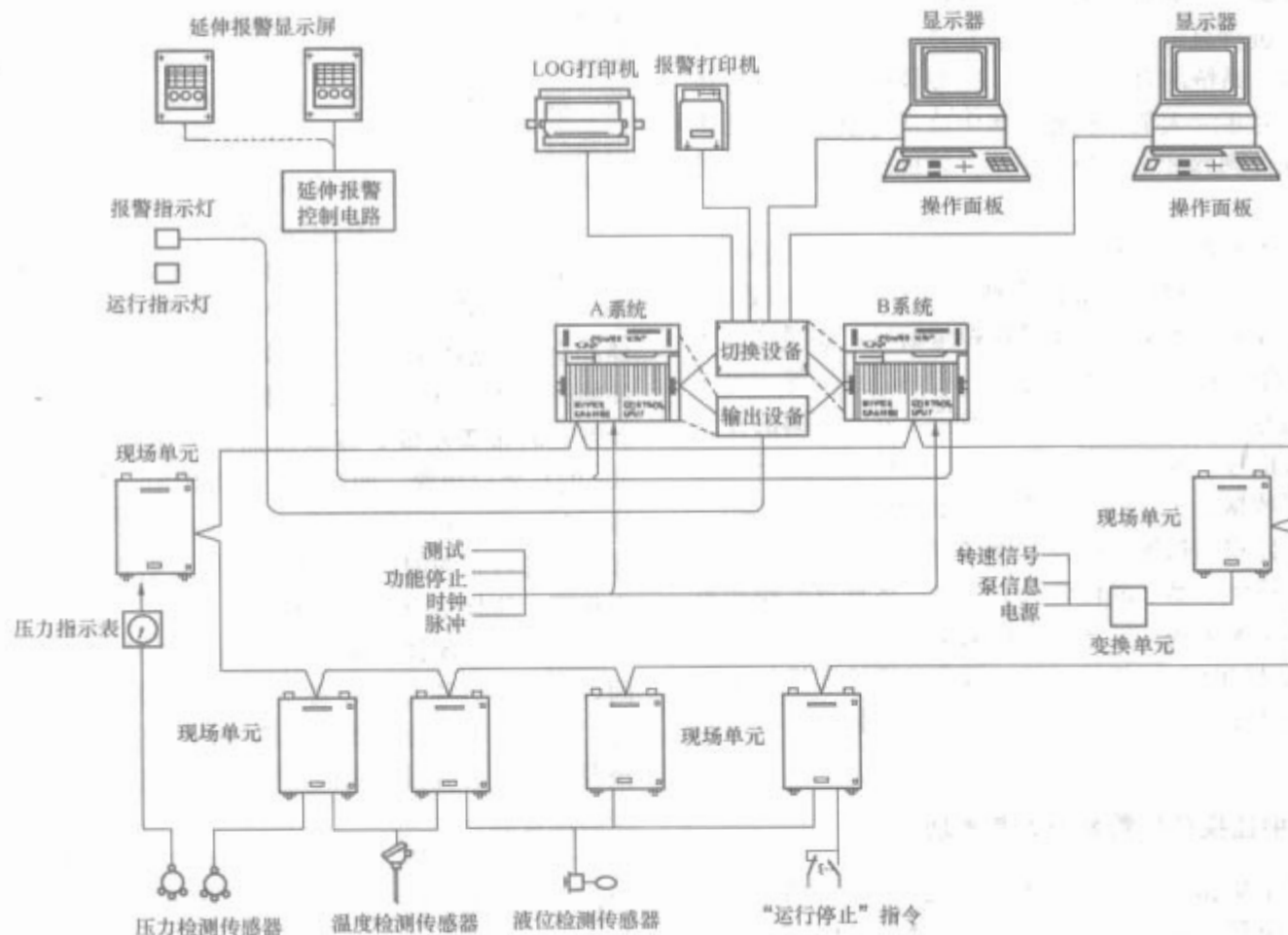


图 7.6-24 SMS-12 型机舱监测与报警系统结构框图

操作面板如图 7.6-25 所示,整个操作面板划分为功能部分、显示部分、打印部分、光标控制部分及数字输入部分。通过操作面板可方便地对 SMS-12 型机舱监测与报警系统进行操作,不需要输入复杂的命令,只要在操作面板上按照操作要求,按下相应部位的按键即可,通过它不仅可实现机舱各设备的运行工况参数的显示、打印、报警应答;还可实现各种报警设定值和延时值的修改、报警闭锁等操作。



图 7.6-25 操作面板

在 SMS-12 型机舱监测与报警系统中,电源部分采用交流电源经过整流后供电,当整流电源发生故障时,将会自动向该系统提供 24V 直流电源。所有的数据储存在内部存储器里,并由系统内部锂电池供电,以防电源消失时内部数据丢失。

SMS-12 型机舱监测与报警系统的主要功能是:分布在机舱内的现场单元接受各传感器所测得的模拟量信号和开关量信号,并进行预处理,然后将预处理后的数据传送到安装在集控室内的主计算机系统(A系统)和备用计算机系统(B系统),计算机系统将接收到的数据与内部预先设定的数据进行比较、处理,并由彩色显示器显示出来。当某一参数出现越限时,系统将发出报警。当机舱处于无人值班时,将通过延伸报警控制回路,把报警信号送至驾驶室、公共场所和值班轮机员住处的延伸报警板(屏),通知值班轮机员到机舱进行处理。同时,报警打印机立即将报警时间及报警内容打印下来。数据打印机可以根据设定的时间间隔,定时打印机舱各设备的运行工况参数,或者随时打印各设备的运行工况参数。还能自动打印设备运行的中午报告。

2.2.2 系统的配置及主要技术规格

(1) 主站的硬件。

1) 中央计算机 SMS-U200A 配置 2 台, 其中处理器 (CPU) 为 MC68000, 主频 8MHz; 寄存器 17×32 位, 直接地址 16M; 存储器 EPROM 768K, RAM 96K; 协处理器为 Z80, 主频 2.5MHz; 寄存器 8×8 位, 直接地址 64K。

2) 20in 彩色显示器 SMS-U19A-2 配置 2 台, 14in 彩色显示器 SMS-U19B-1 配置 2 台, 均为 8 色/字符型, 分辨率为 640×400 、 80×25 行。

3) 显示器控制单元 SMS-U116D 配置 4 台, 其中处理器 (CPU) 为 MC68000; 显示存储器 512K; 串行通信接口 RS232C。

4) 数据打印机 SMS-U24C 配置 1 台, 打印方式为串行字符式, 打印速度为 120 字符/s, 162 字符/行。

5) 报警打印机 SMS-U24C 配置 1 台, 打印方式为串行字符式, 打印速度为 24 字符/s, 26 字符/行。

6) 操作面板 SMS-U240A-1 配置 4 块, 软键开关型。

7) 电源 SMS-U201A 配置 2 台, 输入为 24VDC, 10A; 输出为 24VDC/5VDC/+12VDC/-24VDC。

(2) 分站的硬件。现场单元 HMS-U70C-L 配置 11 台, 其中处理器 (CPU) 为 Z80, 主频 2.5MHz; 寄存器 8×8 位, 直接地址 64K; 内存 EPROM 16K, RAM 8K。

(3) 使用条件。为了保证 SMS-12 型机舱监测与报警系统能正常工作, 必须满足下列使用条件。

1) 温度: $0 \sim 55^{\circ}\text{C}$ 。

2) 相对湿度: $10\% \sim 95\%$ 。

3) 振动: $1 \sim 13.2\text{Hz}$, 振幅 2mm;
 $13.2 \sim 100\text{Hz}$, 加速度 $0.7g$ 。

4) 倾斜: $\pm 22.5^{\circ}/10s$ 。

5) 电源: 采用交流电源时, 电压允许波动范围: $+10\% \sim -15\%$ (连续), $\pm 20\%$ (2s); 频率允许波动范围: $\pm 5\%$ (连续), $\pm 15\%$ (3s); 采用直流电源时, 电压允许波动范围: $+30\% \sim -25\%$ (连续)。

2.2.3 显示功能及其操作

SMS-12 型机舱监测与报警系统的大多数参数, 可以通过操作面板上显示部分的按键调用, 并由彩色显示器进行显示。其显示内容非常丰富, 显示形式多种多样, 可分为索引、报警显示、通道访问、分组访问、自由组合显示、汇总、系统、图形显示、运行时间统计等模式。

(1) 索引模式。索引模式包括索引、总览、分组和属性四种方式, 每种方式具有各自的显示特色。

1) 索引方式。索引方式可以显示所有监测点通道的状态, 并用小方块的形式表示出来。在系统操作面板上按下“INDEX”(索引)按钮, 则显示器的当前屏幕进入索引方式。在屏幕的最上面一行, 显示出系统内部当前日期、屏幕画面的标题内容和当前时间等。并在屏幕上显示出由许多小方块组成的画面, 小方块被编排成 4 列、20 行, 每个小方块表示一个通道。所有监测点划分成每 8 个通道为一组, 每组都有一个标签号。在调阅时, 只要输入一个标签号, 就可以同时显示 8 个通道的工作状态。

2) 总览方式。在总览方式下, 同一屏幕最多可以显示 16 组监测点通道, 如果某监测点是模拟量信号, 则在屏幕上以条形图的方式显示监测点的信息; 如果某监测点是开关量信号, 则在屏幕上以小方块的方式显示监测点的信息。

在屏幕的最上面一行, 显示出系统内部当前日期、屏幕画面的标题内容和当前时间等。在屏幕上显示出由许多条形图及小方块组成的画面, 每个条形图或小方块表示一个监测通道。每个条形图和小方块的颜色所表示的含义与索引方式

下各种颜色所对应的含义相同。

3) 分组方式。屏幕在分组方式下, 在屏幕上可显示出该组 8 个监测通道的状态图。每个通道状态图上部的数字为该通道编号; 中部表示该通道的测量范围, 测量范围为 $0 \sim 600$, 在测量范围中有一淡蓝色长方条, 它的高度对应着该通道的当前测量值, 左侧的红色三角形箭头所对应的数字为报警设定值; 下部为该监测通道名称。利用左光标键“ \leftarrow ”或左光标键“ \rightarrow ”, 可以使屏幕显示在相邻各组之间进行前、后页的切换。

4) 属性方式。在属性方式下, 在屏幕的左侧部分, 显示一个长方形模拟图, 模拟图的高度对应着监测点参数的全量程范围, 例如, 画面中编号为 0203 的主机凸轮轴滑油压力的全量程范围为 $0 \sim 600\text{kPa}$, 则模拟图的高度即为 6 个测量单位。在模拟图的左下部分有一淡蓝色长方条, 它的高度对应着监测点的测量值, 若当前主机凸轮轴滑油压力的测量值为 350kPa , 则淡蓝色长方条的高度即为 3.5 个测量单位。在模拟图左侧的红色三角形箭头所指的位置, 即为监测点的报警设定值。在模拟图的右侧, 有一绿色长方条, 长方条的高度对应着监测点的正常工作允许范围。

上述 4 种显示方式, 均可通过操作面板上的光标键进行相互切换。

(2) 报警显示模式。报警显示模式包括自动报警和窗口报警两种方式。两种显示方式可以在系统模式下按需要进行设定。

1) 自动报警方式。显示器的屏幕无论在何种显示方式时, 只要出现报警, 将立即切换至自动报警方式, 进行报警内容显示, 在报警点通道编号前将出现一个红色星号“*”; 报警点的编号及其测量值也为红色并快速闪烁。按下确认按钮后, 则闪光转为平光, 使报警点通道编号前的红色星号“*”、报警点的编号及其测量值仍保持在红色状态。当运行设备故障排除后报警消失, 则报警点通道编号前的红色星号“*”也随之消失, 报警点的编号及其测量值也由红色转为绿色而进入正常状态。当按下“CRT CLEAR”键时, 屏幕显示内容即被清除, 同时退出自动报警状态。每屏最多可显示 16 个报警内容。当报警超过 16 个时, 显示器屏幕下部将出现“OVER FLOW”(报警溢出)的信息。

2) 窗口报警方式。显示器的屏幕无论在何种显示方式时, 只要出现报警, 将立即切换至窗口报警方式, 屏幕的下部会立即出现一个窗口, 在该窗口中显示报警内容 (其内容与自动报警方式相同), 最多只能显示 3 个报警内容。而屏幕上部的显示内容仍保持为在线监测状态, 并保持原先的显示模式。

(3) 监测点通道访问模式。无论显示器屏幕在何种显示状态, 只要按下“CH CALL (通道访问)”键, 将立即切换至监测点通道访问模式。在屏幕底部显示出“NEXT CHANNEL No. ? (下一通道编号)”信息, 此时, 只要输入需要访问的监测点通道编号, 则被访问的监测点内容和当前监测状态便立即显示出来。显示器屏幕每屏最多只能显示 16 个被访问的监测点, 若超过 16 个, 屏幕显示内容将被刷新, 且显示最新被访问的监测点内容, 最早被访问的监测点内容将被保存在计算机的存储器中, 可利用上、下光标键进行翻阅。当按下“CRT CLEAR”键时, 屏幕显示内容即被清除, 同时退出通道访问状态。

(4) 分组访问模式。无论屏幕在何种显示状态, 只要按下“GROUP CALL (分组访问)”键, 将立即切换至监测点分组访问模式。在屏幕底部显示“DISPLAY GROUP No. ?

(分组编号)”信息,此时,只要输入需要访问的分组编号,则被访问的这一组监测点内容和当前监测状态便立即显示出来。显示器每屏最多只能显示16个监测点,所以当这一组监测点超过16个时,屏幕显示内容可能有好几页,此时屏幕底部将出现“CONTINUE...DISPLAY GROUP No.?”。轮机员只要利用上、下光标键便可在同组相邻页之间进行翻阅。利用左、右光标键便可在相邻组之间进行翻阅。当按下“CRT CLEAR”键时,屏幕显示内容即被清除,同时退出分组访问状态。

(5) 自由组合显示模式。在分组访问模式下,各组的监测点均已相对固定,无法更改,而在自由组合显示模式下,轮机员可以根据自己的需要,任意组合,最多可以登记注册4页内容,每页最多可以登记注册16个通道,一共可以显示 4×16 个通道的监测状态。无论屏幕在何种显示状态,只要按下“FREE DISPLAY (自由组合显示)”键,将立即切换至自由组合显示模式菜单。自由组合显示菜单共有四项,项目编号为1、2、3、4,每项内容需要用一页显示。在屏幕底部的提示行会出现需要显示哪一项菜单的提示,如果需要显示第一项的自由组合情况,则利用数字键输入“1”后用回车键确认,屏幕上将出现第一项的内容。若在屏幕底部的揭示行上出现需要显示通道编号的提示,在此状态下,轮机员可以按照自己的需要任意调整或增减显示内容。

(6) 汇总模式。在汇总模式下,共有四种状态,分别为报警内容汇总、报警闭锁汇总、报警历史记录汇总、传感器故障历史记录汇总。要进入汇总模式,可以直接按下“SUMMARY”(汇总)键。此时,屏幕上出现汇总模式菜单,共有四项,项目编号为11、21、31、41。在屏幕底部的提示行上,当数字键输入项目的编号时,便可进入汇总模式的四种不同状态。

1) 报警内容汇总。在汇总模式菜单状态下,当屏幕底部的揭示行上输入“11”后,再按下回车键确认时,则进入报警内容汇总状态,屏幕上出现报警汇总内容。每屏最多只能显示16个报警内容,如果记录不超过16个,则在画面底部的提示行将出现END OF LARM SUMMARY(报警汇总结束)!!;当超过16个报警时,在该屏底部的提示行将出现CONTINUE……,利用左右光标键可以在前后页之间进行翻阅,如果连续按下回车键,则依次向后翻页显示。如果按下“MENU”键,则屏幕显示内容将返回至汇总模式菜单页。如果按下“CRT CLEAR”键,则退出报警内容汇总状态。

2) 报警闭锁汇总。在汇总模式菜单状态下,当屏幕底部的提示行上输入“21”后,再按下回车键确认时,则进入报警闭锁汇总状态,屏幕上出现报警闭锁的内容,所有的内容均呈黄色。在闭锁内容的编号前,将出现“R”或“I”标志,“R”表示该报警监测点是由外部信号所闭锁。“I”表示该报警监测点是由于属性被改变而闭锁。在此状态下,如果被闭锁的监测点出现测量值达到报警极限值,将不再发出报警。如果按下“MENU”键,则屏幕显示内容将返回至汇总模式菜单页。如果按下“CRT CLEAR”键,则退出报警闭锁汇总状态。

3) 报警历史记录汇总。在汇总模式菜单状态下,当输入“31”后,再按下回车键确认时,则进入报警历史记录汇总状态。每屏最多只能显示16个报警历史记录。当记录超过16个时,可通过左右光标键在前后页之间进行翻阅,如果连续按下回车键,则依次向后翻页显示。每条记录的内容分别为报警点的通道编号、报警内容、报警发生的时间以及

报警消失时间。如果按下“CRT CLEAR”键,则退出报警历史记录汇总状态。

4) 传感器故障历史记录汇总。在汇总模式菜单状态下,当输入“41”后,再按下回车键确认时,则进入传感器故障历史记录汇总。每屏最多只能显示16个传感器故障历史记录。如果记录超过16个时,利用左右光标键可以在前后页之间进行翻阅;如果连续按下回车键,则依次向后翻页显示。每条记录的内容分别为监测点传感器故障的通道编号、传感器内容、故障发生的时间以及故障消除时间。如果按下“CRT CLEAR”键,则退出传感器故障历史记录汇总状态。

(7) 系统模式。在系统模式下,可以设定和改变系统监测或打印的数据。按下系统模式键(SYSTEM MODE),将进入系统模式菜单页,在该菜单页上共有五项选择菜单,分别为系统数据更改、属性更改、系统自检、外部设备更改和现场单元初始化。

1) 系统数据的更改。在系统模式菜单状态下,当屏幕底部的提示行上输入菜单编号“1”后,再按下回车键确认时,即进入系统数据更改状态。在显示屏幕上,可以对系统的日期、时间及定时打印记录的时间间隔进行设定或修改。当按下光标键“CURSOR”后,系统日期后面将出现一个闪亮的小方块光标“■”,利用数字键,按照日/月/年的顺序依次输入新的日期后,并按下回车键确认即可。

利用上下光标键可以使小方块光标“■”在日期、时间及定时打印记录的时间间隔三条修改项中移动,可以使操作人员按需要对上述三项或三项之一进行修改。如果按下“MENU”键,则屏幕显示内容将切换至系统模式菜单页。如果按下“CRT CLEAR”键,则退出系统数据更改状态。

2) 属性的更改。在系统模式菜单状态下,当输入菜单编号“2”后,再按下回车键确认,即进入属性更改状态。在显示屏幕上,可以对系统内数据的属性进行检查确认或修改操作。此时,在屏幕底部的提示行上,要求输入监测点的通道编号(CHANNEL No.?),利用数字键,输入需要更改属性的监测点通道编号后,按回车键确认,此时,屏幕上出现属性更改画面。当按下光标键“CURSOR”后,屏幕上将出现一个闪亮的小方块光标“■”,利用上下光标键可以使小方块光标“■”移到需要修改项的后面,用数字键依次输入修改值后,按回车键确认。此时,屏幕底部的提示行将出现YES/NO的再确认。1—YES, 0—NO,选择YES,则系统将按照新输入的修改值更改;如果选择NO,则系统将放弃刚才的更改。选择“1”后再按下回车键确认,则修改完成。修改结束后,如果按下“MENU”键,则屏幕显示内容将切换到系统模式菜单页。如果按下“CRT CLEAR”键,则退出系统属性更改状态。

在属性更改状态下,只能对监测点的报警设定值、报警延时时间、报警闭锁状态等内容进行修改。

3) 系统的自检。在系统模式菜单状态下,当输入菜单编号“3”后再按下回车键确认,即进入系统自检菜单状态。在显示屏幕上,可以对显示器的显示色彩、系统内部之间的通讯是否正常进行检查。在屏幕的上部,显示系统当前工作日期、当前画面内容和系统当前时间等内容。在屏幕的中部,显示系统外部设备的编号及其名称。在屏幕的下部,有一警告,提醒操作人员注意,此功能仅供专业人员对系统维护时使用。在屏幕底部的提示行上,当输入设备编号“01”并按回车键确认后,即进入设备自检测试页。如果自检测试的内容与标准测试的内容不相符合,说明该设备存在异常;如果自检测试的内容与标准测试的内容完全一致,则说明该

设备正常。在自检测试页状态下,如果按下“MENU”键,则屏幕显示内容将切换至自检菜单页,再按一次“MENU”键,则屏幕显示内容将切换至系统模式菜单页。如果直接按下“CRT CLEAR”键,则退出系统自检状态。

4) 外部设备的更改。在外部设备的更改状态下,可以对主站计算机的运行状态及备用状态进行更改设定;对显示器的工作方式进行设定;对数据记录打印机及警报打印机进行屏蔽设定等。在屏幕底部提示行,当输入菜单编号“4”后按回车键确认,即进入外部设备更改状态。在屏幕上分别显示CPU的编号、工作方式及工作状态;显示器的编号、工作方式及工作状态;打印机的编号、工作方式及工作状态。在屏幕底部的提示行,当输入设备编号并按回车键确认后,即可对设备的工作状态进行更改。

如果按下“MENU”键,则屏幕显示内容将切换至系统模式菜单页。如果直接按下“CRT CLEAR”键,则退出外部设备更改状态。

5) 现场单元初始化。只有当现场单元的软件版本被改变或其CPU芯片被更换,才有必要对现场单元进行初始化。在系统模式菜单状态的底部提示行,当输入菜单编号“5”后按回车键确认,即可进入现场单元初始化状态。在屏幕底部的提示行,输入需要初始化的现场单元的编号后按回车键确认。即可对现场单元进行初始化。

(8) 系统状态模式。无论屏幕在何种显示状态,只要按下“SYSTEM STATUS (系统状态)”键,就可切换至系统状态模式。此时,屏幕显示系统状态画面,在该画面上,分别为CPU的编号、工作方式及工作状态;显示器及打印机的编号、工作方式及工作状态;现场单元的编号及工作状态。如果要退出该画面状态,只要按下“CRT CLEAR”键即可。

(9) 运行时间统计模式。监视系统对机舱内各主要设备及马达的运行时间进行统计,并随时提供它们的累计运行时间。无论屏幕处于何种显示状态,只要按下“RUNNING HOUR” (运行时间) 键,都可以切换至运行时间统计菜单画面。在该画面的最上面一行,显示系统当前工作日期、当前画面内容、系统当前时间等内容。在画面的中部,为6组菜单。在画面底部的提示行上,输入某一菜单编号后按回车键确认,则画面上显示所指定的菜单组内所有设备的累计运行时间。

2.2.4 打印记录功能及其操作

SMS-12型机舱监测与报警系统具有故障报警打印记录和工况参数打印记录功能,故障报警打印记录包括报警打印、报警汇总打印、报警延时时间打印、报警参数设定值打印等形式。工况参数打印记录包括参数定时打印、参数随时打印、中午报告打印等形式。

(1) 故障报警打印记录。

1) 报警打印。SMS-12型机舱监测与报警系统在对机舱各监测点的参数进行监测时,一旦工况参数出现越限,报警打印机将自动打印出监测点的报警时间、通道编号、名称、报警时的当前值、参数值的计量单位等内容,其中报警时间、通道编号及名称等用红色打印。当运行设备故障排除监测点参数恢复正常后,则用黑色打印监测点正常的内容。

对于一些辅助设备,如分油机、泵马达等在运行中出现故障停止时,报警打印机将打印出设备名称、通道编号、报警时间等内容,并用红色打印出“STOP”,表示该设备处于故障停止状态。当故障停止的设备被确认,并由故障停止状态转为手动停止状态时,报警打印机将用黑色打印出

“STOP”,表示该设备已处于正常停止状态。当重新启动该设备时,报警打印机将以黑色打印出“RUN”,表示该设备已处于正常运行状态。

2) 报警汇总打印。随时对当前所有报警进行分类汇总,存放在内部存储器中,如需将汇总内容打印出来,轮机员可在操作面板上按下“ALARM SUM”键,此时报警打印机将会将当前所有的报警汇总内容打印出来。

3) 报警延时时间打印。系统在对各监测点的参数进行监测时,一旦所监测的参数出现越限,将根据预先设定的延时时间发出报警。如需将系统内所有的报警延时时间打印出来,轮机员可在操作面板上按下“DELAY TIMER”键,此时报警打印机将会将通道编号、通道名称、延时时间等打印出来。

4) 报警参数设定值打印。系统在对各监测点的参数进行监测时,每一个通道的参数均对应一个报警设定值,一旦所监测的参数超过或低于报警设定值时将出现越限报警。在操作面板上按下“SET VALUE”键,打印机就可将通道编号、通道名称、报警参数设定值及单位等内容打印出来。

(2) 工况参数打印记录。

1) 工况参数定时打印。在参数定时打印状态下,参数记录打印机可以将机舱各监测点的工况参数定时打印出来。定时打印记录的间隔时间,可在显示功能中系统模式状态下的时间间隔修改项中进行设定。一般可以设定为4h、8h、12h等。参数记录打印机只对当前时间、各参数的通道编号及参数的当前值进行打印。如果系统所检测到的参数处于异常状态,则用红色打印出来;如果参数处于正常状态,则用黑色打印出来;如果参数处于报警闭锁状态,则用黑色圆点符打印出来。

当参数记录打印机在缺纸、故障或关机的状态下无法进行工况参数打印时,报警打印机将自动替换参数记录打印机。在打印过程中,如果系统监测到某参数出现异常报警时,则当定时打印记录结束后,报警打印机立即由参数记录打印状态返回到报警打印状态,将系统当前所监测到的报警内容全部打印出来。

2) 工况参数随时打印。轮机员可在任意时间起动参数记录打印机,将需要的参数或者全部参数随时打印出来。在操作面板上按下“DEM LOG”键,即可起动打印机。若要停止打印,可在操作面板上再次按下“DEM LOG”键。

在打印过程中,打印机对系统的当前时间、各参数的通道编号、名称及参数的当前值进行分类打印。当参数打印结束后,打印机将自动从随时打印状态转为定时打印状态。

3) 中午报告打印。中午报告打印是指,在每天中午参数记录打印机自动将系统的当前时间、所监测参数的通道编号、名称、各通道的当前数值以及当前工作状态分类打印出来,或者当系统存储了连续6次的定时打印记录后,自动按中午报告的格式打印出来。

2.3 DataChief C20 现场总线型机舱监控系统

DataChief C20机舱监控系统是由挪威KONGSBERG公司研制开发的,它是目前世界上较为流行的现场总线型全分布式监控系统的典型代表。该系统集成了监测报警、数据采集和控制的功能。系统采用模块化设计,并通过现场总线和本地局域网进行通信,使系统构建非常灵活。DataChief C20机舱监控系统还可通过局域网与船上其他控制系统联网,构成全船综合自动化。该监控系统按照无人值班机舱要求《AUT-0》级进行设计,适用于任何类型的船舶,能够满足广大船厂和船东的需要。

2.3.1 系统的结构

Datachief C20 机舱监控系统的结构如图 7.6-26 所示。该系统是由遥控操作站 (ROS)、船长操作站 (Fleetmaster)、局域网 (LAN)、分布式处理系统 (DPS)、网关

(GW)、系统网关 (SGW)、延伸报警系统或称监视呼叫系统 (WCS) 等部分组成。其中分布式处理系统如图 7.6-27 所示, 包括现场总线 (CAN)、分布式处理单元 (DPU)、现场操作站 (LOS)、便携式调试工具等部分。

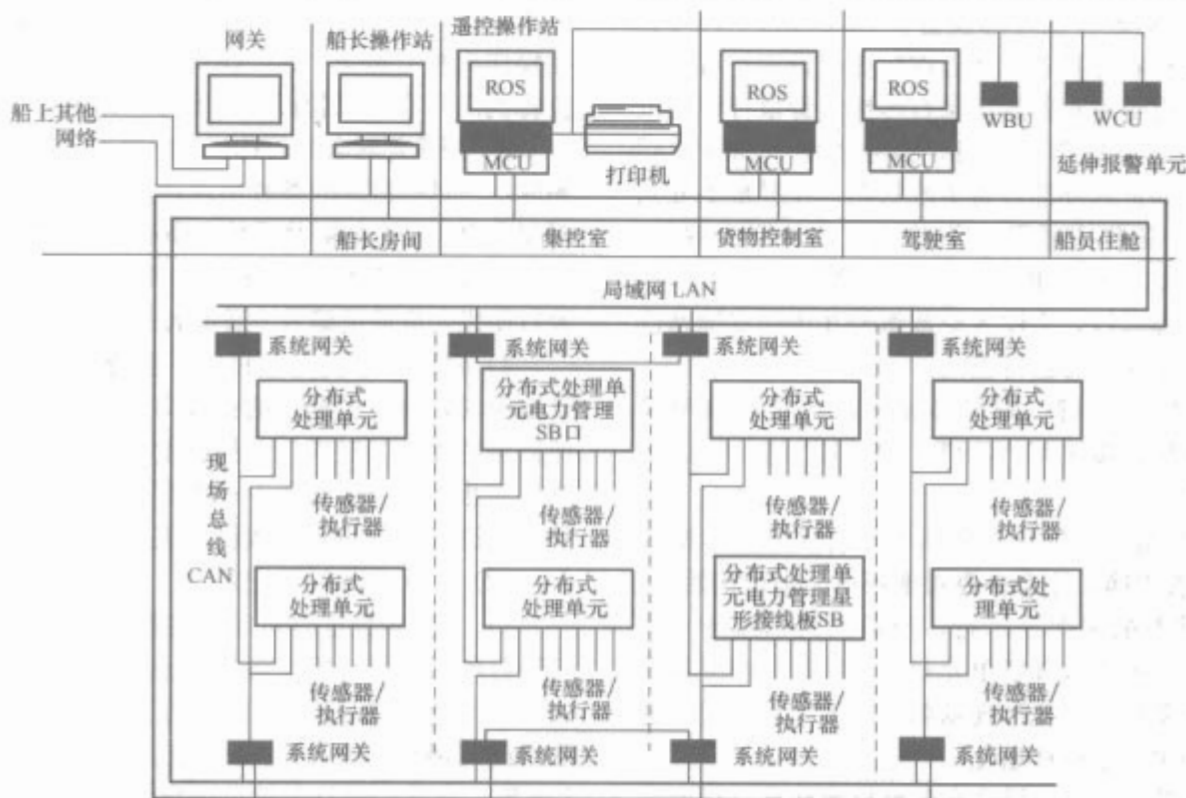


图 7.6-26 Datachief C20 系统结构框图

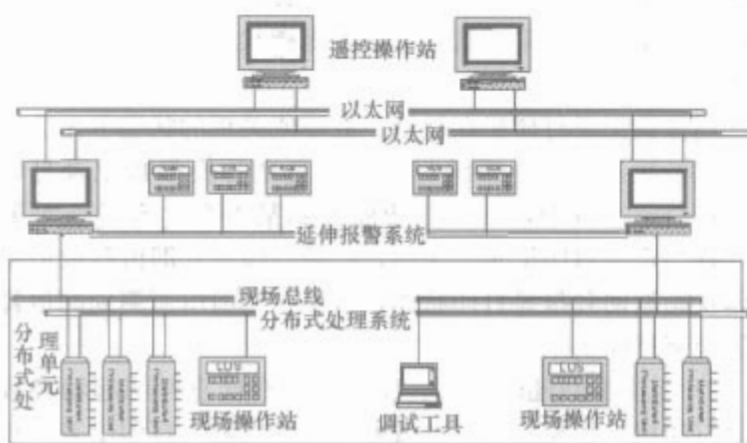


图 7.6-27 分布式处理系统

(1) 遥控操作站 (ROS)。

1) 遥控操作站的组成和任务。DataChief C20 系统的操作是由遥控操作站来完成。它由四部分组成: 主计算机单元、操作控制面板 (OCP)、彩色显示器和打印机。主计算机单元是一台装有 Intel 奔腾 II 处理器的个人计算机。操作控制面板是一个专门设计的特殊键盘, 通过它可以方便地实现各种不同的操作功能。OCP 被划分为几个独立的功能区, 例如报警区、模拟图区、辅助控制区等, 通常一个按键可以激活一种功能并且显示一幅画面。该操作面板上还装有一个“消声”按钮。根据船东的不同要求, 还可以配备标准的鼠标和键盘。打印机采用标准打印机, 用来报警打印记录和参数打印记录。

ROS 除了安装在集控室外, 还安装在驾驶室、货物控制室、船员办公室以及船舶的其他部位。ROS 通过以太网局域网 (LAN) 和现场总线 (CAN) 与分布式处理单元 (DPU) 相连接。所有的 ROS 都是并行连接的, 没有主站和从站之分, 它们之间的通信是通过双 LAN 网进行的。遥控操作站在 DataChief C20 监控系统中可以完成以下 4 个任务: ①可以通过 CAN 总线向现场的分布式处理单元收发数据;

②对报警信息进行监测和显示, 并且具有应答功能; ③在机舱无人值班的情况下, 可将报警信号通过 CAN 总线传送给延伸报警系统; ④作为通向局域网 LAN 的网关。

2) 遥控操作站的功能。ROS 使用的是 Windows NT 操作系统, 它不仅可以提供给操作者一些报警信息, 如报警显示、报警历史记录、报警分类等, 还可以显示一些柴油主机和其他设备的模拟图。操作者通过这些模拟图可方便地对运行设备进行监测和控制, 以及修改相应参数。若在一台 ROS 中修改了报警上、下限设定值或设备参数, 系统将自动更新其他 ROS 中的相应数据。所有操作者的动作, 例如泵的起动或停止, 报警极限的改变, 都将以时间为标记记录在 ROS 中。

ROS 的一些重要功能会根据其所安装的部位不同而不同。例如安装在船员办公室的 ROS 只能用于监测和显示, 而不允许对运行设备进行控制。所有的模拟图只能查看, 而不能对其进行操作。当分布式处理单元所采集到的数据发生变化时, 它将通过 CAN 总线自动更新每一个 ROS 中的数据库, 因此 ROS 中所显示的数据都是实时的。ROS 用于存放一些处理数据、工程数据和软件等。

(2) 船长操作站 (Fleetmaster)。安装在船长房间的操作站是一台连接到局域网的计算机, 它作为一个船队管理的操作站, 只能实现监测和显示的功能, 而没有控制功能。Fleetmaster 还可以与船舶外部通信系统连接以便与岸上进行数据交换。在 Fleetmaster 中安装了由 Kongsberg 公司自主开发的 ShipViewer 软件, 计算机通过 ShipViewer 软件可以监测主机遥控系统、电力管理系统、火灾探测系统和油量控制系统的运行状况, 并且能够显示船舶的实时数据和模拟图、报警汇总内容、报警历史记录、阀门的开或关状态, 设备的运行或停止等。

(3) 现场操作站 (LOS)。现场操作站实际上是一个人机交互式操作控制面板, 它包括一个可显示 4 行 40 个字符

的液晶显示器 (LCD 显示) 和一些操作者使用的按钮。它的主要功能是使操作者能够在现场对分布式处理单元 (DPU) 的输入/输出模块进行访问, 查看 DPU 上所处理的数据, 对设备进行现场操作, 对输入输出信号进行仿真、参数调整, 以及查看系统内置的自诊断程序。

(4) 局域网 (LAN)。遥控操作站与系统网关之间由一条 10Mbit/s 的双冗余以太网连接, 两条路径都处于激活状态。以太网采用双绞线, 也可采用光纤电缆。通信软件遵循 TCP/IP 标准。

(5) CAN 现场总线。双冗余的 CAN 现场总线用于连接分布式处理系统的不同单元, 它通过系统网关与局域网连接。CAN 总线的最高传输速率为 1Mbit/s。CAN 总线采用普通的船用型双绞线, 软件协议遵循开放式 CAN 总线的定义。

(6) 网关 (GW)。网关包括系统网关 (SGW) 和双处理通信控制器 (dPSC) 两种类型。网关的主要目的是对不同网段进行隔离以及在大型系统中连接现场总线, 信息通过网关可在不同网段中进行传输, 也可对挂接在 CAN 总线上的一些设备 (如 DPU 模块、LOS、WBU 等) 进行保护。如果某个节点的通信失败, 网关将产生一个系统失败信息, 并确定失败的节点。

(7) 分布式处理单元 (DPU)。

1) 分布式处理单元的功能及类型。分布式处理单元 (DPU) 用来连接现场传感器和执行器, 实现模拟量或数字量的输入以及模拟量或数字量输出驱动外围设备。它的主要功能是对现场数据的采集和控制, 并通过 CAN 总线传送到 ROS 和其他的 DPU 模块。几个不同的 DPU 模块组合在一起就可以完成一些特殊的控制与监测功能。为了使 DPU 模块完成不同的功能, 在 DPU 工作前, ROS 根据各个 DPU 的地址将专门的软件和参数下载到模块中。这样就可以使 DPU 模块完成报警、控制、安全和一些复杂的功能, 将监控功能彻底的下放到现场, 完成了真正意义上的分布式控制。

各模块完成各自不同的功能, 它们之间具有一些共同的特性, 其中包括: 所有参数存储于模块中; 可以进行远程设置; 无调整器或跳线; 所有的连接都是可插拔的; 适合直接安装于主发动机的上层结构中; 机壳上装有模块状态指示灯, 用来指示看门狗状态、运行状态、总信息、模块初始化状态和电源极性等信息。

2) 智能 I/O 模块的结构。所有的智能 I/O 模块都有相同的外部结构并采用相同的电路设计原则。智能 I/O 模块在硬件上由三部分组成: ① CPU 及通信部分; ② I/O 接口部分; ③ 电源部分。

(8) 监视呼叫系统 (或称延伸报警系统) (WCS)。监视呼叫系统包含了延伸报警和值班呼叫的功能, 是实现无人值班机舱的一个必要条件。它包括硬件部分、软件部分以及用于通信的 CAN 现场总线。硬件部分包括驾驶室监视单元 (WBU)、舱室监视单元 (WCU) 和一台服务器/计算机。该服务器由一台主计算机 (MCU) 和操作面板 (OCP) 组成, 或者是一台标准的带键盘和显示器的个人计算机。该服务器/计算机除了可以从 LAN 网采集到的报警信息通过 CAN 总线传递给 WCS 面板外, 还接收来自监视呼叫系统的应答信号。WBU、WCU 也称延伸报警单元, WBU、WCU 用于显示报警信息, 并可发出声光报警, 同时还能提供当班轮机员的值班信息。软件部分是装载在 ROS 中的 WCS 软件程序。

2.3.2 系统的功能

Datachief C20 系统主要是为了实现无人值班机舱, 对机舱中各种机电设备的运行状态和参数, 进行监测、显示、记录、报警和控制。它除了具有一般机舱监测报警系统的基本功能外, 还有一些控制功能。具体的功能包括以下六个方面。

(1) 人机界面。

1) 操作控制面板。每个遥控操作站都有一块操作面板, 该操作面板上带有球形鼠标、功能按键或指示灯。标准面板功能包括: 报警显示选择和应答功能; 监测显示选择和设置功能; 记录设置和激活功能; 参数调整; 对现场控制单元的遥控操作; 延伸报警和值班呼叫功能。当只需要监测和报警时, 操作面板的控制功能就被闭锁。

2) 报警和监测数据显示。系统包括几个显示窗口实时显示报警和监测数据。其中报警窗口包括: 报警分组显示窗口 (由分组报警按钮激活); 报警汇总窗口, 包括所有目前处于报警状态的报警点的列表; 报警历史窗口, 包括带有时间标志的报警点的连续列表。监测数据窗口, 包括: 分组显示, 包含一个报警组中的所有检测点的列表; 选点显示; 标签细节显示, 给出系统中每个测量点的详细信息。

3) 模拟图和状态显示。数据库中有几个标准图形, 用以显示柴油主机和辅助设备的一般信息, 这些图形根据用户需要来显示。模拟图和状态窗口有: 主机排气温度和平均温度; 备用泵状态汇总; 执行器和阀的状态汇总; 趋势曲线; 电力管理; 主配电板和发电机。另外, 针对每个工程, 将根据管路图设计特定的模拟图, 这些窗口用来显示设备状态 (开关、运行、停机等), 并且是交互的, 以便对设备进行操作。

4) 记录/硬拷贝。在特定的时间间隔内或根据实际需要, 可以设置不同的记录内容和形式并且自动打印。记录功能包括: 报警记录 (报警和恢复正常的时间标记); 选点记录; 完整记录; 分组记录; 闭锁点记录。如果安装的是彩色打印机, 报警点将被打印成红色。硬拷贝单元是用于打印模拟图窗口的。

5) 自检和诊断。分布式处理单元具有在线内嵌自检功能, 可以监测这些分布式处理单元的温度、功率以及传感器的扰动。结果可以从遥控操作站查看。根据需要, 遥控操作站的自检和报警功能可以通过按下“报警检测”按钮来初始化。另外, 当打开电源时, 元器件都被自动检测。

6) 火灾报警系统。通过 RS422 串行通信方式, 可以将火灾报警系统连到 Datachief C20 系统。只要 Datachief C20 系统接收到火灾报警系统传来的信息, 遥控操作站将显示发生火灾区域的甲板平面图。

7) 操作者跟踪。操作者跟踪系统可以通过 RS422 口串接到 Datachief C20 系统。只要 C20 系统接收到操作者跟踪系统传来的信息, 遥控操作站就会显示表示操作者当前操作活动的甲板平面图。

8) 访问控制。本系统采用设置密码方式来限制或开放任何 ROS 对过程的控制。对报警设定值或参数的修改也是通过设置密码方式来进行保护。所有的操作实施时间、对报警设定值的修改均被记录下来, 并作上时间标记。

(2) 监测报警功能。

1) 模拟量报警, 包括以下功能: ① 设备故障报警; ② 低低限报警, 并执行停车动作; ③ 低限报警; ④ 高限报警; ⑤ 高高限报警, 并执行停车动作; ⑥ 报警解除带有一个死区, 以避免报警波动; ⑦ 为消除输入信号的波动, 滤波参数

可调;③延时触发报警和返回至正常信息的延时。

2) 开关量报警,包括以下功能:①低限报警;②高限报警;③报警解除;④延时触发报警和返回至正常信息的延时。

3) 报警闭锁。某些报警是有条件的,即处于某个特定的条件下报警被闭锁。该功能的实现是通过定义某个信号为一个特定报警或一个特定报警组的闭锁信号。既可以在现场也可以在控制室进行。为了延长闭锁状态,对每个信号的延时时间可调。

4) 延伸报警和值班呼叫。延伸报警和值班呼叫功能组合在一起,包括设备报警的分组指示;机舱集控室、驾驶室、轮机员住舱之间的值班信号联络。

5) 控制系统的报警信息。过程控制、发电机控制以及数据采集系统在执行控制和逻辑功能时将产生一些报警信息,这些信息将在现场或集控室作为一般报警信息被显示。

6) 报警应答。报警应答功能就是通过按下某个键来对屏幕上显示的某点或某组报警进行应答。在模拟图显示画面、报警分组显示画面或报警汇总显示画面都可以进行报警应答。

7) 主机排气温度监测。Datachief C20 系统的主机排气温度监测系统计算单个气缸同所有气缸平均值之间的偏差,如果偏差超过允许值将给出报警。排气温度偏差是根据主机负载连续计算出来的。当主机负载增加时,报警死区变窄。另外还应该考虑每个气缸的排气管道和传感器安装位置不同所造成的气缸和气缸之间变化量的不同,每排气缸进行单独计算,每台主机或每排气缸最多有 12 个气缸。

由于使用平均温度来计算偏差,因此必须校正每个气缸的温度,以便所有的气缸都可以得到同样的参考温度。校正是在主机满负载运行状态下进行的。低于预先设定的平均温度,偏差报警将被阻断。

8) 趋势监测。趋势监测系统可以提供系统中所有变量的历史数据曲线。Datachief C20 系统可以自动记录所有数字量和模拟量的测量值,将其保存下来以备在趋势系统中使用。该系统是存储在遥控操作站的一个集成的软件模块。该系统有两个功能可以在操作控制面板上实现,即“选择趋势”功能和“显示趋势”功能。

“选择趋势”是指操作者可以指定系统中哪些变量作为显示的趋势曲线。操作者可以指定五个不同的趋势曲线显示画面,每个画面可以包含 8 个变量,即总共可以显示 40 个变量的趋势曲线。“显示趋势”功能将显示被选定变量趋势的连续曲线。当前值显示在窗口的右边,过去值显示在窗口的左边。可以设定每条曲线的颜色。

9) 燃油节省系统。燃油节省系统可以监测船上推进装置的燃油消耗,并为操作者提供一个评估操作经济性的工具。系统将显示和以报告的形式打印一个航次中性能参数的瞬时值以及燃油消耗和推进装置轴功率的累计值。这些计算是根据各分布式处理单元的在线测量值得出的,这些分布式处理单元必须和燃油经济运行系统所必需的所有信号有接口。

10) 运行时间及计数器。为了改进维修计划并且帮助轮机员决定哪些器件需要仔细检查,就需要了解不同器件的运行时间。Datachief C20 系统的运行时间功能就是跟踪一系列特定设备的运行,如泵、风机、压缩机、分油机和发电机等,并按要求把结果提供给操作者。

连接到 Datachief C20 系统的任何一个特定状态信号都可以用于计算运行时间。其中包括两个计数器,并且有两种

不同的功能:一个总运行时间计数器;一个圈数计数器。

根据要求可以打印所有参数及运行小时数的报表,也可以人工复位(如大修后)或者为特定设备调整总运行小时数和每圈时间。

(3) 常用控制功能。所有的数据采集、量纲转换和现场控制功能都是由安装在现场的分布式处理单元 DPU 完成的,这样就确保了即使遥控操作站出现问题,现场操作仍然可以正常进行。

1) 备用泵控制。Datachief C20 系统的泵控制是由装载在分布式处理单元中的程序来完成的,也可以由集控室中的遥控操作站来进行远程控制。泵的起动和停止可以以两种方式通过遥控操作站来完成。通过备用泵的模拟图;通过监测控制系统中的一幅模拟图。

a. 低压下备用泵起动。当压力低于备用极限值时,自动起动备用泵。如果使用的传感器信号是模拟量,极限值可以调整。

b. 阻断备用泵起动。当泵处于故障停止后起动或者组起动时,备用泵的起动就被阻断,直到压力建立起来为止。备用逻辑也可以由外部状态控制,如主机停车、辅机停车等。

c. 故障停止后重起动。有些备用泵需要在故障停止后自动重起动,这些备用泵包含在一个起动序列中,在 DPU 备用泵逻辑中定义了时间(秒数),这个时间决定了起动序列。序列的定时可以由操作者通过备用参数按键来调整。

d. 组起动。一系列备用泵可以按照某一序列由远程控制单元起动。

e. 备用泵逻辑报警。包括:备用起动报警;自动起动失败或出错;无备用报警(表示一个停止的泵不再处于备用模式)。

控制功能需要用到压力开关量和/或模拟量传感器。

Datachief C20 将所有的极限值作为数据库的一部分下载到相关的 DPU 中,并且极限值可以通过遥控操作站或者现场操作站来调整。

在两个或三个泵的系统中,为了保持冗余,来自马达起动器或者现场的信号都被引入不同的 DPU 中。这样,即使某个 DPU 发生故障,备用逻辑仍可工作。即使操作站在现场,备用泵逻辑仍然运行。

2) 阀控制。Datachief C20 系统的阀位控制功能是由装载于某些 DPU 中的软件模块完成的。这些 DPU 中包含一些必要的信号接口,其中包括被控变量和反馈信号的输入接口以及控制信号的输出接口。阀控制系统同 ROS 和所有阀的通信是通过模拟图窗口激活的。

a. 阀的类型。

单作用阀:这种类型的阀是通过一个数字量的指令输出通道和一个或两个数字量的反馈输入通道控制的。阀位(关或开)由来自两个限位开关的信号给出。

双作用阀:这种类型的阀是通过两个数字量输出通道和两个数字量输入通道控制的。阀的开和关是由继电器脉冲控制的。

带位置控制的双作用阀:这种类型的阀是通过两个数字量输出通道、两个数字量输入通道和一个模拟量输入通道控制的。输入一个脉冲信号,阀可以输出一个死区(已定义)范围内的位移信号。

b. 附加功能。阀控制系统还具有以下功能:脉冲输出;自动关闭一组可自动开/关阀,利用死区在一个模拟量设定点关闭;低位自动关闭带远程开/关功能的阀,当“低位”开关打开时关闭;自动开/关带远程开/关功能的阀,当“低

位”开关打开时关闭;当复位报警时阀切换。

3) PID 控制器。Datachief C20 的 PID 控制系统是由装载于遥控操作站并且下载在某些分布式处理单元中的一系列软件组成的。这些 DPU 中包含了必要的信号接口,其中包括被控变量和反馈信号的输入信号接口以及控制指令的输出信号接口。每个控制器通过一个现场操作站(LOS)或者 ROS 来调节,并且显示调节过程中的参数及数值。

几个 PID 控制器可以组合起来进行控制。串行控制的实现就是通过把两个控制器相连,一个控制器的输出连到另一个的输入上。

控制器是通过 ROS 来设置的。可以被选择和调整的设置参数包括:调整参数(增益、积分时间、微分时间);控制器设定点;输出模式(实际控制模式、自动模式、阀位控制模式、半自动模式);控制器类型(P、PI、PD、PID);输入和输出信号类型;采样时间。

4) 压缩机控制。Datachief C20 的压缩机控制系统是由装载于遥控操作站并且下载在某些分布式处理单元中的一系列软件组成的。这些 DPU 中包含了必要的信号接口,其中包括被控变量和反馈信号的输入信号接口以及控制指令的输出信号接口。其主要功能就是使气瓶的压力保持为一个常量。其功能包括:远程手动或自动启动与关闭压缩机,故障停止后重新启动和自动排水控制。

压缩机控制系统可以同 Datachief C20 的遥控操作站进行通信。在系统的遥控操作站以及某一个现场操作站上都可以对压缩机进行监测和控制。

5) 分油机控制。Datachief C20 的分油机控制系统是由装载于遥控操作站并且下载在某些分布式处理单元中的一系列软件组成的。这些 DPU 中包含了必要的信号接口,其中包括被控变量和反馈信号的输入信号接口以及控制指令的输出信号接口。NORCONTROL 的分油机控制程序是针对操纵 ALFA LAVAL 的自清洁燃油分油机而编写的,包括以下设备的操作:原油驳运泵(可选);原油温度控制器;分油机;密封阀;排油阀。可以通过 ROS 或者就近的 LOS 控制这些设备。选择分油机设置是通过手动直接操纵不同的旁通阀来进行的。DPU 中的程序可以识别分油机是串行运行还是并行运行,在模拟图窗口中用绿色来显示油路,从而表示了操作模式。1 号分油机始终用于分水,而 2 号分油机可以设置成分水或者分离杂质。

6) 锅炉控制。Datachief C20 的锅炉控制系统是由装载于遥控操作站并且下载在某些分布式处理单元中的一系列软件组成的。这些 DPU 中包含了必要的信号接口,其中包括被控变量和反馈信号的输入信号接口以及控制指令的输出信号接口。程序包括标准 PID 控制并且适合不同类型的锅炉。NORCONTROL 锅炉控制系统广泛采用了故障检测,并且专门设计了故障自动停炉和报警的程序。锅炉系统的参数可以在临近的 LOS 或者 ROS 上显示,所有的参数都可以在 ROS 的蒸汽系统模拟图窗口中显示。锅炉控制包括以下设备的控制:燃油备用泵;燃烧器马达;燃油预热器;喷嘴;点火单元;风门调节板;蒸汽泄放阀。这些设备都连接到某一 DPU 并且由其控制。

(4) 电力管理功能。电力管理系统(PMS)可以完成船上所有的电力生成和电力分配任务,包括电站安全和经济运行必须的自动功能。电力管理系统是由连到每台发电机的分布式处理单元(DPU)组成。每个分布式处理单元执行所连发电机组的电力管理功能。本系统适用于由柴油机驱动的发电机或者由蒸汽轮机驱动的发电机或者轴带发电机。根

据驱动装置的不同,DPU 可以有不同的配置和控制策略。DPU 和 ROS 相连,操作者可以在 ROS 上对监测和控制功能进行初始化。

电力管理系统还适用于船上发电机和母线的特殊配置。为了实现将报警、控制和安全这些功能分离的最新规则,这些功能都被分别装载在不同的 DPU 中,这些单元都在一条双冗余 CAN 现场总线上相互连接。电力管理系统的功能包括发电机控制和轴带发电机的电力管理。其中发电机控制功能有:同步、频率控制/负载分配、负载不平衡分配、负载均衡分配、根据负载情况启动/停止备用发电机、掉电后自动启动连接、重载询问等。

轴带发电机的电力管理功能有:轴带发电机断路器和汇流排断路器自动同步的控制;船首和船尾推进器的连接和断开控制;控制辅助发电机 DPU 的总体控制等。

(5) 货物和压载功能。船舶液位测量系统通过分布式处理单元同传感器相连。该系统可以连接的传感器范围很广。对于压载水舱、燃油舱、淡水舱液位以及吃水的测量一般采用电动式传感器或者采用可以浸在水中的压力传感器,对货舱若采用雷达传感器或者特殊设计的压力传感器测量的液位将更精确。

在装卸货物时,这套系统根据船舶的纵倾、横倾以及各舱液体的密度对现场传感器测得的信号进行修正,计算出各舱液位和吃水,并且将结果以图形和文字形式传送到遥控操作站上显示,从而为操作者提供船舶安全必需的参数。容量和吃水表存储于系统中,计算结果被传送到遥控操作站并用模拟图显示。

(6) 船队管理功能。船队管理系统是 Datachief C20 的一个延伸系统,是指在船上以及船东办公室进行信息管理,通常包括以下功能。

在船上:记录来自船长房间、监测报警及控制系统以及货物控制系统的数;对船上的数据进行组织与存储;数据的显示以及打印报表;通过 E-mail 或者 FTP 向船东或者其他相关人员传输数据。

在船东办公室:组织和存储船队发来的数据;显示和打印来自船队的数;船队数据的趋势评估;传输数据给外界相关人员,如船级社、租船人等。

1) 船队管理系统设置在船上的设备。船队管理系统设置在船上的设备包括:船队管理系统的网关、船队管理系统的船舶浏览器、船队管理系统 E-mail、FAX(传真机)和 Telex(电传)、船队管理系统的船舶数据管理。

2) 在船东办公室的设备。船队管理系统设置在船东办公室的设备包括:船队管理系统的远程访问、船队数据管理器、船队管理系统的船舶浏览器。

3) 在船东办公室的数据。船上的数据都被记录和保存在船东办公室,这些数据显示了船舶的状态。所有的模拟量和数字量数据值都在模拟图中显示,包括报警汇总和报警历史记录。当船上发生事故或者出现问题时,通过本系统,管理人员和船员。

3 船舶柴油机曲柄箱油雾浓度监视报警器

曲柄箱油雾浓度监视报警器是保证柴油机安全运行的重要装置之一。我们知道,在高温时滑油会产生油气,这些油气在曲柄箱中与 70℃ 左右的较冷空气混合形成油雾,当油雾浓度超过标准时,可能会引起曲柄箱的爆炸事故。柴油机装有曲柄箱油雾浓度监视报警器后,一旦油雾浓度超过正常标准时,能及时发出声光报警,同时使主机自动降速或

停车。

3.1 Mark5 型油雾浓度监视报警器

目前,在船上所采用曲柄箱油雾浓度监视报警器种类繁多,但工作原理相近。Graviner 公司的 Mark5 型油雾浓度监视报警器是在新船上应用较多的一种。它以单片机为监视报警的核心部件,对曲柄箱油雾浓度进行检测、监视、显示、报警及对主机进行安全保护。与老式的 Mark4 型相比较,它取消了许多机械旋转部件,大大提高了监视报警器工作的可靠性。同时,它采样准确,执行速度快,并具有较强的自检功能。是现今较为先进的一种曲柄箱油雾浓度监视报警器。该监视报警器主要是由采样切换电磁阀、油雾浓度检测单元、显示报警单元以及控制电路组成。这些单元均分装在一个控制箱中,该控制箱面板如图 7.6-28 所示。在控制箱的下部有十个采集曲柄箱油雾气样的采样管口(使用中接几根采样管视主机的缸数而定),一个清洗空气(压力为 0.1MPa)管接口,还有两根 3m 长的电缆,一根用于接电源,一根用于监视报警器的输出。

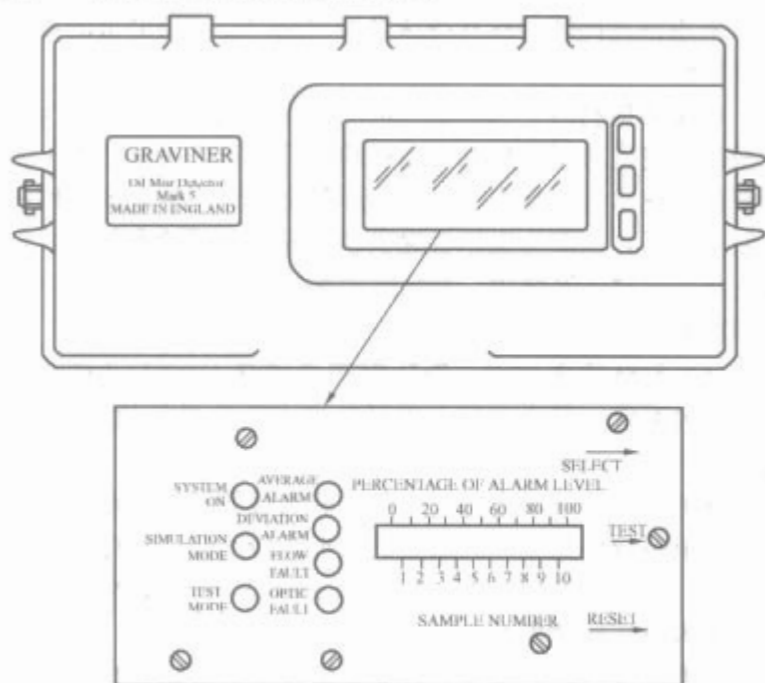


图 7.6-28 Mark5 型浓度监视报警器面板图

在控制箱的显示板上,有三个状态指示灯,即 SYSTEM ON (系统接通电源亮),SIMULATION MODE (系统模拟检测时亮),TEST (对系统进行功能测试时亮)。有四个报警和故障状态指示灯,即 AVERAGE ALARM (发生平均浓度报警时亮),DEVIATION ALARM (发生偏差浓度报警时亮),FLOW FAULT (系统不能正常采样时亮),OPTICAL FAULT (光学系统有故障时亮)。此外,还有三个操作按钮,即 SELECT (选择采样显示点按钮),在正常运行时,若按下此按钮,则系统只检测现行采样点,并显示其油雾浓度;TEST (测试按钮),对系统进行测试时要按下此按钮;RESET (复位按钮),该按钮用于系统复位。当监视报警器某些预选参数需要重新调整时,参数调整后要按下此按钮,以确认所调整的参数并重新起动系统,使系统恢复到正常运行状态。在面板上还有一个液晶显示器,用来显示采样点和曲柄箱的油雾浓度。不过,该显示器不是直接显示采样点油雾浓度的具体值,而是显示其浓度相当于报警浓度设定值的百分数。显示百分之百的浓度时,就是报警的设定值。

3.1.1 气样的采集与测量

各曲柄箱油雾气样采集与测量单元的工作原理如图

7.6-29 所示。该单元共有 11 个两位三通电磁阀,其中有 10 个电磁阀分别采集各曲柄箱的气样,该系统最多可检测 10 个缸的气样。如果是 6 缸柴油机,只用其中 6 个电磁阀,空 4 个不用。另有一个清洗空气电磁阀,用压缩空气通过该电磁阀清洗测量系统。系统在正常运行期间,单片机轮流使各采样点电磁阀通电,通电的电磁阀(如图所示采样点 1 的电磁阀)左位通,该曲柄箱油雾气样在抽风机作用下流经测量室,其他点的采样电磁阀断电右位通,曲柄箱气样在抽风机作用下,经旁通管路排出而不经测量室。

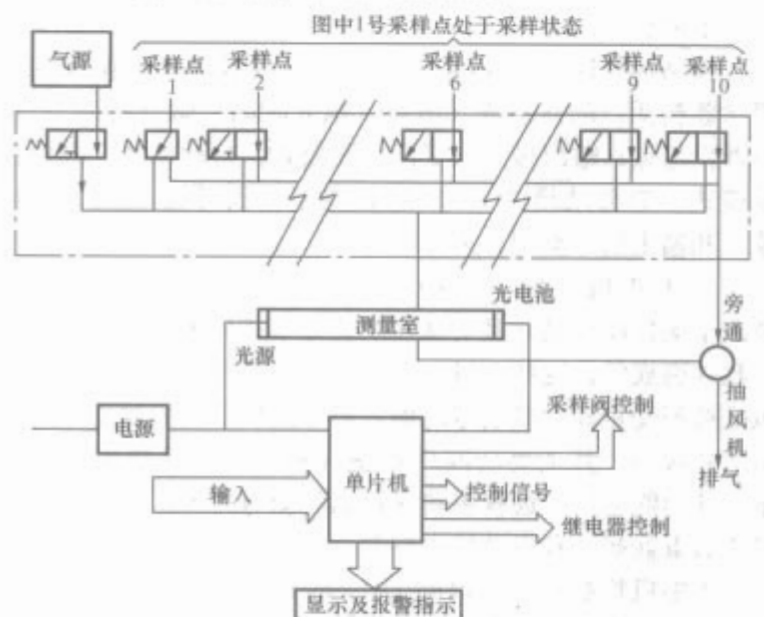


图 7.6-29 气样采集及报警指示

测量部分是由测量室、光源和光电池组成的,光源接通电源后将发射一束光强不变的平行光并照射在光电池上。当流经测量室待测气样油雾浓度变化时,其气样的透光程度发生变化,即照射在光电池上的光强也发生变化,光电池输出的电流大小与接收到的光强成一定的函数关系。该电流信号经 I/U 转换成电压信号,并经变增益放大器后送至 A/D 转换器转换成数字量送入单片机。单片机先把每个缸曲柄箱气样油雾浓度分别存在 RAM 中的一个单元,然后把所有缸曲柄箱气样油雾浓度值加在一起被缸数除,得到一个平均浓度值并存入 RAM 的一个单元中,以后每检测一个缸的曲柄箱气样油雾浓度值,就与平均浓度相比较得到一个偏差浓度值,并用新检测的浓度值取代原先所检测到的该缸气样的油雾浓度值,即可算出一个新的平均浓度值,单片机再把这两个值与报警设定值相比较,如果平均浓度值达到浓度报警值或偏差浓度值达到偏差浓度报警值,都将在液晶显示器上显示“100”(实际上是报警值的 100%),并发出声光报警,同时向主机安全保护系统送去一个故障降速或故障停车信号。

在正常运行期间,单片机定时使清洗空气电磁阀通电一次,电磁阀通电后左位通,气源经该阀左位进入测量室。该压缩空气一方面对光源、光电池及测量室进行清洗。防止光电池和光源被油雾污染而影响测量精度;另一方面,压缩空气对测量室、光源和光电池起冷却作用,以提高它们的使用寿命,同时也能防止光电池因温度升高而产生的特性漂移。除此之外,测量单元要检测一次空气的油雾浓度,该值此时应该为零,如果不为零,则要比一下与原零点偏差值有多大,若偏差不大,则以新得到的零点为相对零点并取代原零点。若偏差较大,系统则认为光源或光电池污染严重,清洗无效,OPTICAL FAULT 灯亮,发出报警并终止采样。

3.1.2 报警设定值的调整

该监视器对曲轴箱油雾浓度报警有两种形式,即平均浓

度报警和偏差浓度报警。平均浓度报警是指,所有缸曲轴箱油雾的平均浓度超过平均浓度报警值时所发出的报警。偏差浓度报警是指,某缸曲轴箱的油雾浓度高于平均浓度并超过偏差浓度报警值时所发出的报警。

平均浓度报警值的可调范围是 $(0.3 \sim 1.3) \text{ mg/L}$ 。平均浓度报警值是通过灵敏度电位器 SENSITIVITY 来调整的,该电位器共有七个选择位置,若选择“5”挡位,则平均浓度超过 0.98 mg/L 时,将发出平均浓度报警。但是在发报警信号之前,系统首先用清洗空气清洗一次测量单元,以确定该平均浓度值不是因光源或光电池污染所引起的。发平均浓度报警信号时,停止采样过程,液晶显示器显示油雾浓度为 100%; AVERAGE ALARM 灯亮;主报警继电器通电,发出声光报警的主报警信号;故障降速或故障停车继电器通电,发出主机故障降速或停车指令送至主机的安全保护装置。如果没有平均浓度报警,显示器将显示平均浓度达到报警值的百分数。假定灵敏度电位器设定在“5”挡位,若平均浓度的显示值为 60%,则说明平均油雾浓度为 0.45 mg/L 。

偏差浓度报警值是通过电位器 DEVIATION 来调整的,其可调范围是 $(0.05 \sim 0.5) \text{ mg/L}$ 。若偏差浓度报警值调整在 0.05 mg/L ,则某采样点油雾浓度在平均浓度的基础上加 0.05 mg/L 以上就会发出偏差浓度报警。平均浓度报警与偏差浓度报警的关系示意图如图 7.6-30 所示。同样在发偏差浓度报警前,要用清洗空气清洗一次测量单元,以确定不是光源和光电池污染所引起的。发偏差浓度报警时,停止采样。显示器上显示采样点编号及报警值 100%; DEVIATION ALARM 灯亮;主报警继电器通电,发主报警信号;故障降速或停车继电器通电发出主机降速或故障停车指令。如果没有偏差浓度报警,显示器将逐个显示采样点及采样点油雾浓度达到报警值的百分数。

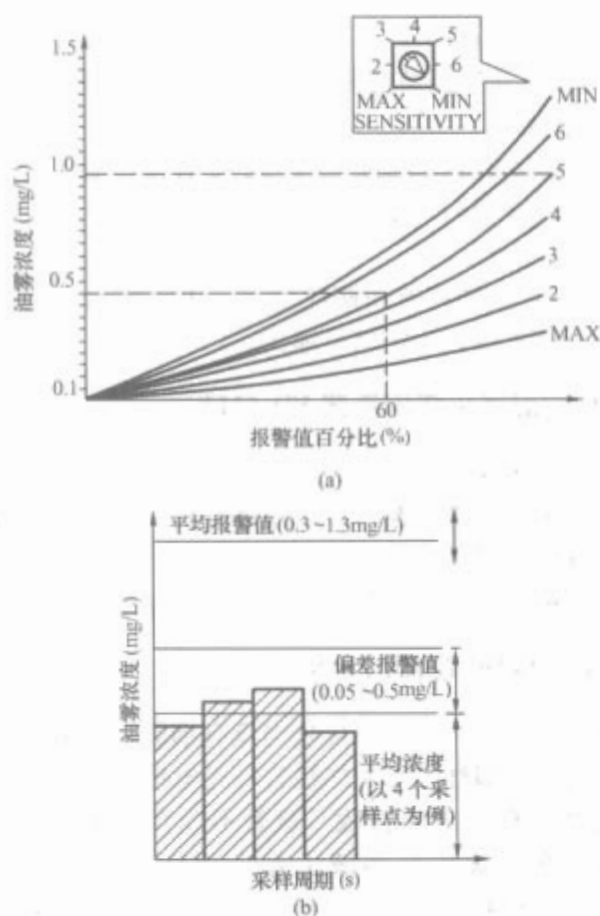


图 7.6-30 平均浓度报警与偏差浓度报警的关系示意图

(a) 平均浓度报警; (b) 偏差浓度报警

3.2 MD-9M/14M 型油雾浓度监视报警器

DAIHATSU 公司的 MD-9M/14M 型油雾浓度监视报警器也是在新船上应用较多的一种油雾浓度监视报警器。同样它也以单片机为监视报警的核心部件,对曲柄箱油雾浓度进行检测、监视、显示、报警及对主机进行安全保护,面板及内部结构图如图 7.6-31 所示。检测的基本原理与 MARK5 类似。

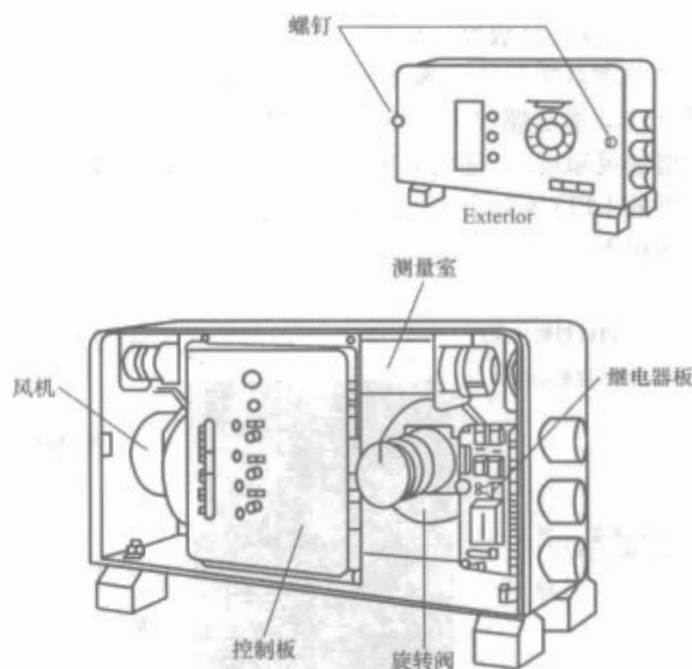


图 7.6-31 面板及内部结构图

(1) 主要特点。

- 1) 采用了单片机从而提高了系统的性能和稳定性。
- 2) 系统具有自动调零的功能。
- 3) 测量室由发光二极管和高性能的 Si 光电池组成。
- 4) 油雾浓度可以很方便地通过 16 只发光二极管以三种不同地颜色表示出来。报警的输出有两个阶段(轻微和最终报警)。
- 5) 旋转阀由一台步进电动机带动。
- 6) 系统具有自检功能。

(2) 浓度指示器工作原理。在测量室内一端的光电池接收到的来自另一段的 LED 发出的光线,光线的强弱取决于测量室内油雾浓度。油雾浓度越高,光电池接收到的光线强度越弱,反之就越强。这样光电池将根据油雾浓度的大小等比例地产生一电压信号,该信号被送进 CPU 板进行处理并得到相应的油雾浓度值,并由浓度指示器显示出来。

(3) 报警。当最终报警时,旋转阀就停止转动,正好指示油雾浓度超标的缸号。

(4) 系统故障。当自检程序发现系统内部出现故障时,会通过油雾浓度指示灯 LED (1~3) 之一闪烁报警并停止运行。此时无法通过 RESET 按钮复位重启。

(5) 功能测试的步骤。

- 1) 按下 TEST 按钮。
- 2) 旋转阀指示到端口 0 并停止旋转。电磁阀动作送入清洁空气到测量室。
- 3) 大约 4s 后,电源指示灯闪烁表示在进行功能测试。
- 4) 接着油雾浓度指示灯 LED 会逐渐依次向上点亮到一定位置停下来。
- 5) 继续按一次 TEST 按钮,电源指示灯闪烁。当油雾

浓度指示灯 LED 亮到 10 时, 轻微报警灯亮; 亮到 15 时, 经 0.5s 的延迟, 最终报警灯亮。

6) 结束功能测试后, 再按一次 TEST 按钮, 电源指示灯保持常亮, 电磁阀复位, 系统回到正常运行。

(6) 初值设定。初值设定是指在油雾浓度监视报警器投入正常运行前要确定检测的缸数和设定油雾浓度报警的灵敏度。首先要将面板罩卸下, 然后做以下两步。

1) 缸数设定开关。根据实际要检测的主机的缸数旋转缸数设定开关到对应的值。

2) 增益 (灵敏度) 调整。当主机正常运行在最大负载时, 调节增益螺钉使油雾浓度指示器指示 2~4 号 LED 亮。顺时针转动增益螺丝将使油雾浓度指示器的 LED 等向上点亮 (增加灵敏度), 逆时针转动增益调节螺钉将使油雾浓度指示器的 LED 等向下点亮 (降低灵敏度)。增益 (灵敏度) 调整面板图, 如图 7.6-32 所示。

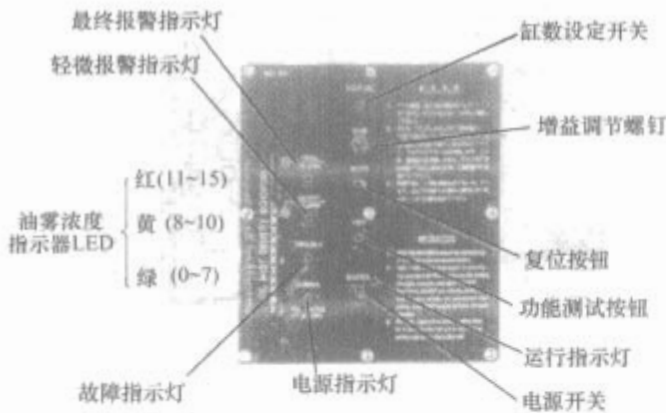


图 7.6-32 增益 (灵敏度) 调整

(7) 浓度检测的估算。主机的油雾浓度可以通过设定的增益和油雾浓度指示灯点亮的个数根据图 7.6-33 来进行粗略的估算。

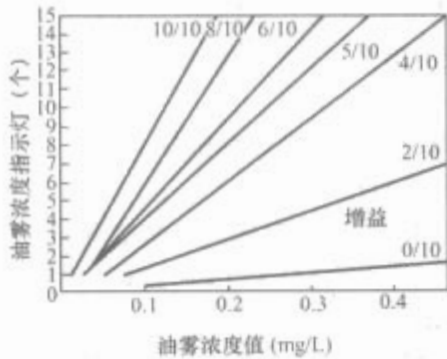


图 7.6-33 浓度检测的估算

4 船舶火警监测系统

4.1 概述

目前运行在先进集装箱船舶上有一套火警检测系统, 该系统由一日本公司制造, 其系统的结构框图如图 7.6-34 所示。其中核心控制元件是火警控制板 FF-6032-30。一块 FF-6032-30 能最多连接 30 个输入输出回路, 能监视各探测器送来的信号, 并根据情况发出声光报警、停止相应动力设备、起动现场灭火设备和发送信号到副报警板等功能。其中火警控制板及各种火灾探测器和手动报警按钮都集成了微处理器芯片, 是一种网络化、低功耗、智能化的监控系统。



图 7.5-34 系统的结构框图

4.2 系统组成

系统组成如表 7.6-1 所示。

表 7.6-1 系 统 组 成		
部件名称及型号	数量	备注
火警控制板 FF-3062-30	1	
副报警板 FF-7135-30	1	
定温式火警探测器 FD-6111	6	
光电式感烟探测器 FD-8311	68	
火焰探测器 FD-5112	9	
接线盒	9	针对 FD-5112
手动火灾报警器 FS-4010	15	防火式
手动火灾报警器 FS-4011-2	6	防滴式
备件箱	1	

4.3 FF-3062-30 火警控制板的技术参数

FF-3062-30 火警控制板的技术参数:

- 1) 可连接回路: 30。
- 2) 主 220V, 60Hz AC, 允许电压波动范围±10%。
- 3) 应急工作电源: 24V DC, 允许电压波动范围 19.2~30V DC。
- 4) 消耗功率: 50W。
- 5) 每个连接回路总电阻: 小于 50Ω (二线制)。
- 6) 终端电阻: 10kΩ。
- 7) 能连接的探测器: 红外线火焰探测器 FD-5112 (每回路最多 20 只); 光电感烟探测器 FD-8311 (每回路最多 20 只)。
- 8) 火警: 主蜂鸣器周期性鸣响; 火灾指示灯常亮; 火警位置指示灯常亮; 火灾信号输出。

4.4 典型定温式火警探测器 FD-6111

定温式火警探测器是运用金属热胀冷缩的特性。正常的情况下, 探测器的电路断开; 当温度升到一定值时, 由于金属膨胀、延伸, 导体接通, 于是发出了信号。

探测器的技术参数、外形尺寸和接线如图 7.6-35 所示。

4.5 光电式感烟探测器 FD-8311

光电式感烟探测器的原理是当没有烟雾时, 由于光学迷宫的特殊设计 (即红外发光二极管与光电接收二极管的轴向夹角成钝角等等), 光电接收二极管不能直接接收到红外发光二极管 (在火灾报警领域主要采用红外波段, 波长在 900nm 左右) 发射的光信号, 当有火灾发生时, 烟雾扩散到探测器的迷宫之内会对红外发光二极管的发射光产生散射, 从而使光电接收二极管能够接收到散射光信号, 光信号的大小标志着烟雾浓度, 也标志着火灾燃烧的程度。探测器 FD-8311 的技术参数、外形尺寸和接线如图 7.6-36 所示。

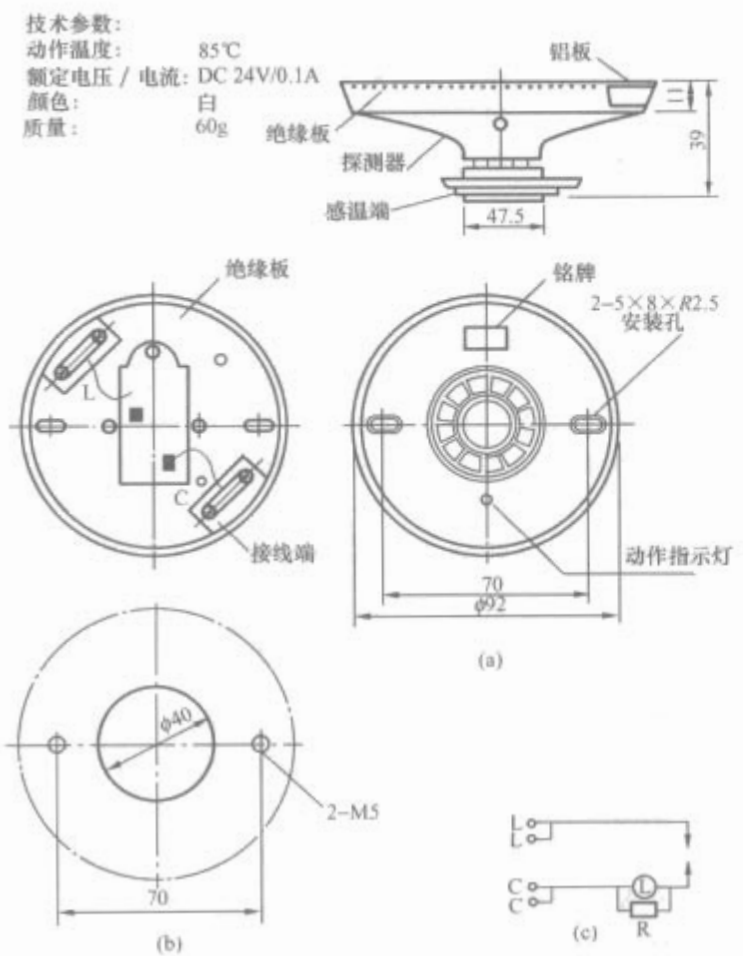


图 7.6-35 定温式火警探测器 FD-6111 技术参数、外形尺寸和接线

(a) 技术参数、外形尺寸; (b) 底座及安装孔; (c) 接线图

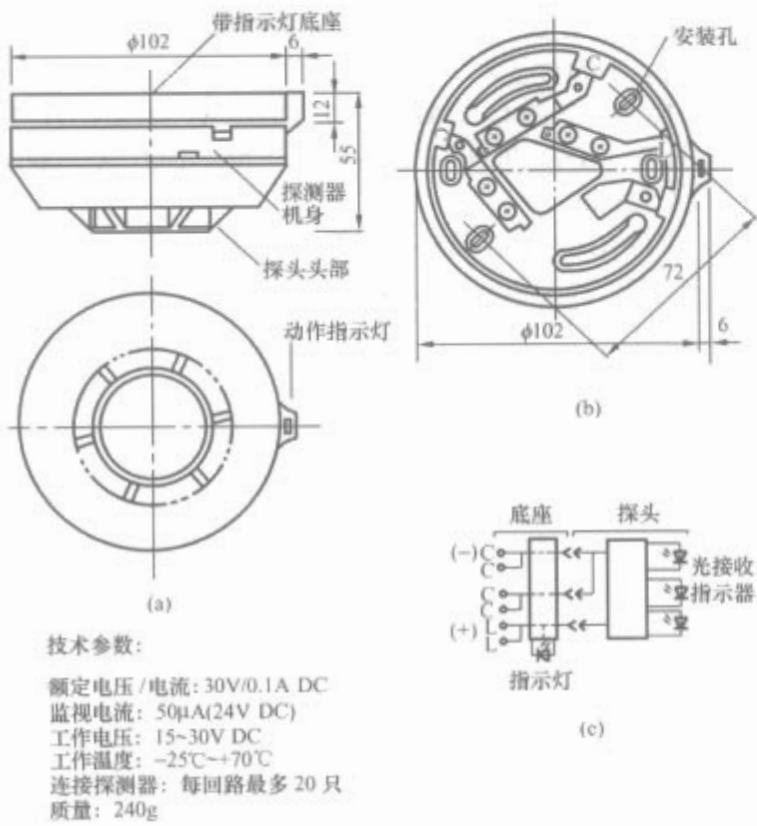


图 7.6-36 光电式感烟探测器 FD-8311 技术参数、外形尺寸和接线

(a) 技术参数、外形尺寸; (b) 底座; (c) 接线

4.6 红外线火焰探测器 FD-5112

一种红外光辐射探测器。物质在燃烧时,由化学反应产生闪烁的红外光辐射使硫化铅红外光敏元件感应,转变成电信号,经放大后,就能报警。探测器 FD-5112 的技术参数、外形尺寸和接线如图 7.6-37 所示。

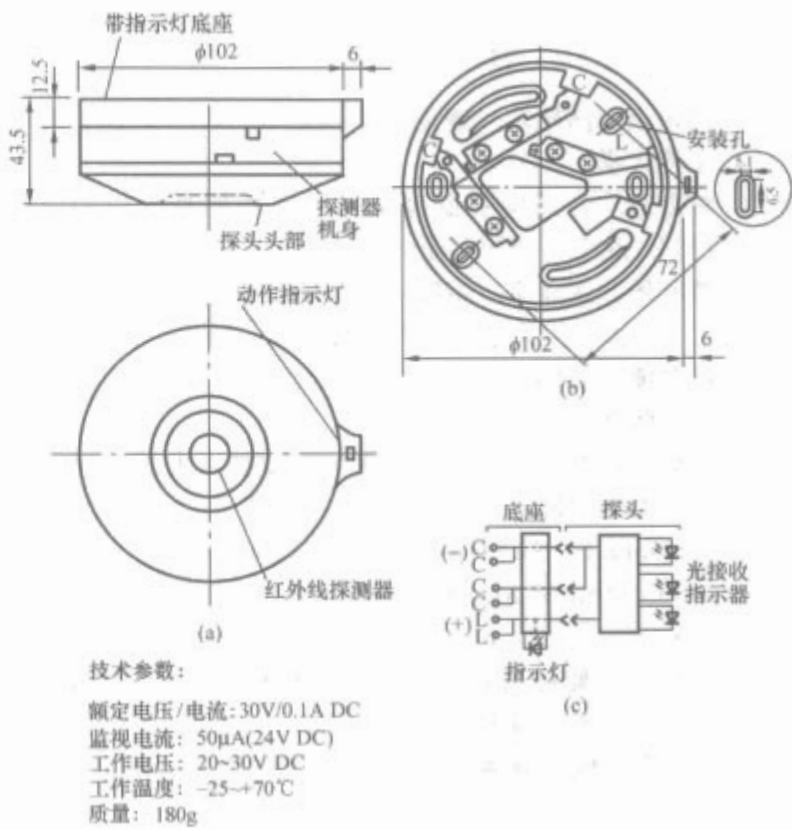


图 7.6-37 红外线火焰探测器 FD-5112 技术参数、外形尺寸和接线

(a) 技术参数、外形尺寸; (b) 底座; (c) 接线

4.7 手动火灾报警器 FS-4011-2

火灾发生时,人为压下报警按钮,按钮的火警灯即亮,火警控制板发出声光报警并显示手动报警按钮的位置。手动报警按钮技术主要在走廊、过道等处。手动报警器 FS-4011-2 的技术参数、外形尺寸和接线如图 7.6-38 所示。

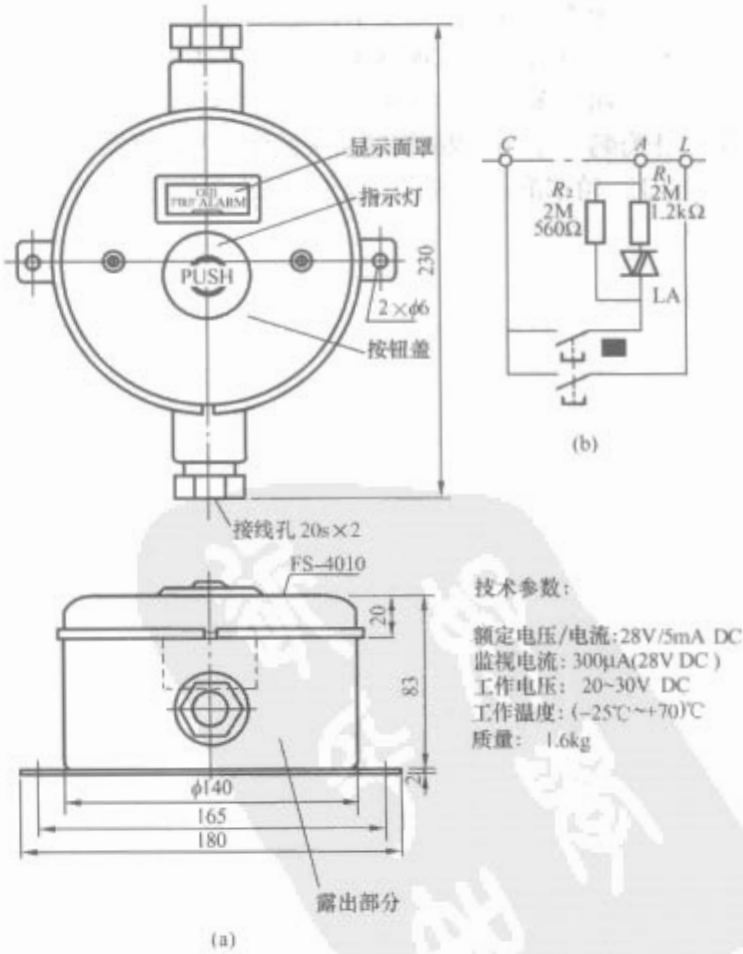


图 7.6-38 手动火灾报警器 FS-4011-2 技术系数、外形尺寸和接线

(a) 技术参数、外形尺寸; (b) 接线

参 考 文 献

- [1] 周永余, 高敬东. 舰船自动操舵仪[M]. 武汉: 海军工程大学, 2001.
- [2] 黄继起. 自适应控制理论及其在船舶系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [3] 贾欣乐, 张显库. 船舶运动智能控制与 H_{∞} 鲁棒控制[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2002.
- [4] 江德潘. 船用导航设备使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [5] 程启明, 万德钧. 船舶操纵的控制技术发展综述[J]. 东南大学学报, 1999, 29(1): 14-19.
- [6] Benjamin K. Golding. Industrial Systems for Guidance and Control of Marine Surface Vessels[R/OL]. <http://www.cesos.ntnu.no>, 2004.
- [7] 翟传润. 船舶智能自适应航迹舵的研究[D]. 上海: 上海交通大学博士后论文, 2002.
- [8] 孟克勤. 舰船减摇装置的性能与展望[J]. 航海技术, 2000, (6): 12-14.
- [9] 陈建国. 船舶横摇运动仿真及减摇鳍系统控制[D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2005.
- [10] 杨承恩, 贾欣乐, 毕英君. 船舶舵减横摇及其鲁棒控制[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2001: 1-12.
- [11] 金鸿章, 李国斌. 船舶特种装置控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [12] Rudder Roll Stabilization[EB/OL]. http://www.bec-ker-marine-systems.com/03_products_content/03_products_pdf/rrs_imagefolder.pdf, 2006.6.5.
- [13] 胡世峰. 舰船减摇鳍新型 PID 控制器的设计[D]. 武汉: 海军工程大学硕士学位论文, 2005.
- [14] 徐培. 升力反馈减摇鳍系统控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2001.
- [15] 张海鹏. 升力反馈减摇鳍系统的研究及随动系统的改造[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2002.
- [16] GJB 2860—97, 舰船减摇鳍装置通用规范[S].
- [17] 金鸿章. 减摇鳍变参数最优控制器及其设计[J]. 中国造船, 1992, (4): 107-118.
- [18] 孟宪尧, 韩新洁, 白广来. 海上作业多用途工作船自动控制系统(一)——动力定位系统的控制与冗余技术[J]. 世界海运, 2004, 27(3).
- [19] 科特罗夫特, 拉梅杰, 赵劲松译. 海上避碰规则指南[M]. 大连: 大连海运学院出版社, 1992.
- [20] 王逢辰等. 船舶操纵与避碰(下册)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992. 1-3.
- [21] 季春群. 动力定位系统的控制方程及模型试验[J]. 海洋工程, 1999, 17(4).
- [22] 姜延春. DP 动力定位系统设计[J]. 广船科技, 2001, 2.
- [23] 无可匹敌的船舶动力定位系统[J]. 机电设备, 2000, 6.
- [24] 夏伟江. 动力定位系统(DPS)船舶的产生、发展及在海洋石油勘探、开发、生产等阶段的应用[J]. 天津航海, 2005, 2.
- [25] 赵志高, 杨建民, 王磊, 程俊勇. 动力定位系统发展状况及研究方法[J]. 海洋工程, 2002, 20(1).
- [26] 徐善林, 黄学武, 崔庆渝合编. 轮机自动化. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [27] 孟宪尧, 韩新洁, 白广来, 吴浩峻编著. 海上作业多用途工作船自动控制系统. 大连: 大连海事大学出版社, 2004.
- [28] 王新全主编. 船舶动力及机械设备控制与监测. 上海: 上海交通大学出版社, 2001.
- [29] KONGSBERG MARITIME CHINA (SHANGHAI) LTD. DataChief C29-System Manual. AU-0661-A, 2000.
- [30] KONGSBERG MARITIME CHINA (SHANGHAI) LTD. Technical Description for DataChief C20. AD-0311-B, 1999.

第8篇 船舶电磁防护技术

主编单位：海军工程大学

中国船舶重工集团公司第七〇一研究所

上海交通大学

中国船舶重工集团公司第七〇四研究所

主 编：肖昌汉 刘大明 王 瑾 陈黎平 张 荣

编写人员：肖昌汉(海军工程大学)

刘大明(海军工程大学)

王 瑾(中国船舶重工集团公司第七〇一研究所)

乔建丽(中国船舶重工集团公司第七〇一研究所)

何乃明(海军驻桂林仪表厂军事代表室)

张 荣(中国船舶重工集团公司第七〇四研究所)

王向军(海军工程大学)

刘胜道(海军工程大学)

王占辉(海军工程大学)

郭成豹(海军工程大学)

嵇 斗(海军工程大学)

李志新(海军工程大学)

第1章 船舶磁性防护技术概述

1 船舶磁场

船舶磁场通常是指船舶在其周围空间产生的磁场,是敌方探测设备及水中兵器用于探测和攻击的主要物理场。船舶磁性防护技术就是采取现代电磁方法和控制技术来控制船舶磁场,将船舶磁场消除或补偿到一定范围内。

1.1 船舶磁场类型

从船舶磁场磁性来源分,船舶磁场可以分为铁磁性磁场、涡流磁场、杂散磁场和低频电磁场。

1.1.1 铁磁性磁场

船舶铁磁性磁场主要来源于船体钢材和船用铁磁设备的磁性,决定于船体和设备铁磁材料的磁特性和地球环境地磁场的磁化。此外,船体的受力情况和环境温度的变化也会影响其磁场特征。对于钢铁建造的船舶,其磁场主要来源于船体的铁磁性磁场,如无特别说明,本篇中的船舶磁性和船舶磁场均指船体的铁磁性和由其产生的铁磁性磁场;对于用低磁或无磁材料建造的特殊船舶,其磁场主要来源于船上的铁磁设备。

1.1.2 涡流磁场

船舶的摇摆运动和机件的旋转运动会切割地磁场,在金属导体内部回路产生涡流电流,该涡流电流在船舶空间中产生相应磁场,称为船舶的涡流磁场。对于钢壳船体,涡流磁场比船体的铁磁性磁场小很多,一般不予考虑。对于低磁钢船壳或无磁材料建造的船壳,如果船舶磁场防护要求较高,涡流磁场是需要防护的对象。

1.1.3 杂散磁场

杂散磁场一般是发电机组、电磁扫雷具、其他电力设备和直流回路、电力推进船舶的推进电动机及其电流回路等产生的漏磁场和电流磁场。钢壳船舶不考虑杂散磁场,只是在高磁性防护要求的船舶上进行防护。

1.1.4 低频电磁场

船体钢材与海水间存在电位差,之间有腐蚀电流通过。这种腐蚀电流(或船体为防止腐蚀增加的阴极保护电流)也会在空间中产生磁场和电场。由于腐蚀电流经螺旋桨及主轴回到船体的过程中,回路电阻发生周期性变化,对腐蚀电流电磁场产生了调制作用,形成了低频变化的电磁场。此外,主动阴极保护电源系统的纹波也会产生低频电磁场。由于其传播特性的特殊性,低频电磁场是现在水中兵器探测和攻击的重要物理场。

1.2 磁场的表示和单位

1.2.1 磁场物理量

磁场的物理量为磁感应强度 B ,或磁场强度 H 。在真空中,磁感应强度 B 和磁场强度 H 在国际单位制中有如下关系

$$B = \mu_0 H \quad (8.1-1)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, H/m, 为真空中的磁导率。一般情况下,空气、海水都被认为是“真空”。

1.2.2 磁场单位

对于磁学量,尽管提倡使用国际单位制,但直到现在,仍然存在两种单位制混用的情况,更由于式(8.1-1)的存在,科技文献或技术报告在描述空间磁场时,经常会发生使用不同的物理量和使用不同单位制进行表述的情况,如果不注意区分,就会发生混淆。

1.2.2.1 磁感应强度 B

(1) 磁感应强度 B 在国际单位制中的单位为特斯拉(T),由于船舶磁场较小,特斯拉单位太大,一般用微特斯拉(μ T)、纳特斯拉(nT)或皮特斯拉(pT)表示,它们与特斯拉之间的关系为

$$1\mu\text{T} = 10^{-6}\text{T} \quad (8.1-2)$$

$$1\text{nT} = 10^{-9}\text{T} \quad (8.1-3)$$

$$1\text{pT} = 10^{-12}\text{T} \quad (8.1-4)$$

(2) 磁感应强度 B 在高斯单位制中的单位为高斯(Gs)。

(3) 磁感应强度 B 在两种单位制中的转换关系为

$$1\text{T} = 10^4\text{Gs} \quad (8.1-5)$$

1.2.2.2 磁场强度 H

(1) 磁场强度 H 在国际单位制中的单位为安每米(A/m)。

(2) 磁场强度 H 在高斯单位制中的单位为奥斯特(Oe),由于船舶磁场较小,一般用毫奥斯特(mOe)或伽玛(γ)表示,它们与奥斯特之间的关系为

$$1\text{mOe} = 10^{-3}\text{Oe} \quad (8.1-6)$$

$$1\gamma = 10^{-5}\text{Oe}$$

(3) 磁场强度 H 在两种单位制中的转换关系为

$$1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3}\text{Oe} \quad (8.1-7)$$

1.2.2.3 船舶磁场单位

(1) 在船舶磁性防护技术中,提倡使用国际单位制,用磁感应强度 B 表示船舶磁场。当描述线圈的磁场和地球磁场对船舶产生磁化作用时,用磁场强度 H 表示。而仅描述线圈磁场和地球磁场在空间的特性时,用磁感应强度 B 表示,因为此时要分析它们与船舶磁场的合成效果。

(2) 由于历史的原因,经常会使用磁场强度的高斯单位制表示船舶磁场和地球磁场,如毫奥等。其中几种主要换算关系为:1Oe 磁场强度对应 1Gs 磁感应强度;1mOe 磁场强度对应 100nT 或 0.1 μ T 磁感应强度;1 γ 磁场强度对应 1nT 磁感应强度。

2 地球磁场

地球磁场是一矢量场,在地球表面空间范围内无处不在,是引起船舶磁场变化的主要原因。

2.1 地球磁场描述方法

2.1.1 磁力线分布

描述地球磁场整体特征的直观方法是磁力线分布。磁力线起始于磁北极而终止于磁南极,不同地点磁力线的方向代

表该点的地磁场方向，磁力线的疏密程度代表地磁场的大小。地球磁场的整体磁力线描述如图 8.1-1 所示。

2.1.2 分量描述

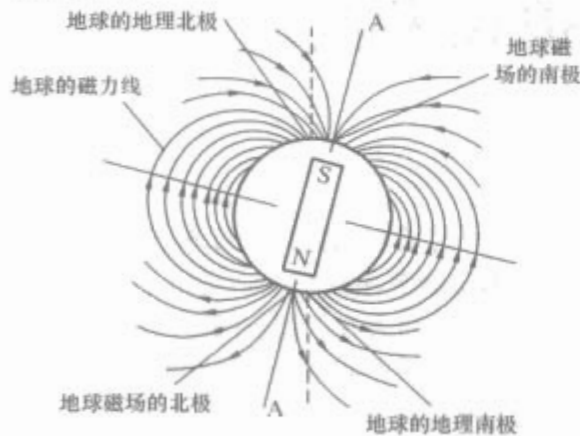


图 8.1-1 地磁场总体分布特征

地球磁场的局部表述是地球表面某一点的磁感应强度矢量在特定坐标系下的分量表示。表示地球磁场局部坐标系的建立方法为：以地球表面某点的切平面为 XY 平面，X 轴方向沿地球子午线指向地理北方向，Y 轴沿纬线指向地理东方向，Z 轴向下，与 XY 一起构成直角坐标系。XYZ 坐标系及其与各要素之间的关系如图 8.1-2 所示。

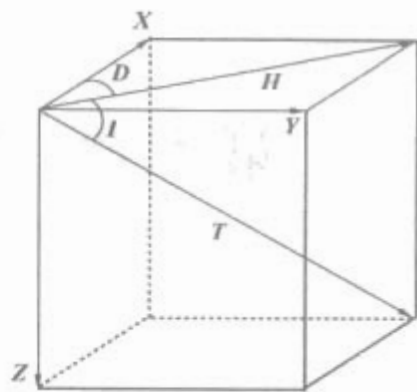


图 8.1-2 地理坐标系与地磁要素的关系

2.1.3 三种不同的地磁要素

以地球磁场在上述坐标系下的不同表示方法，可以得到三种不同的地磁要素①地磁总量、磁偏角、磁倾角，②水平分量、磁偏角、垂直分量；③X 分量、Y 分量、Z 分量。第一种地磁要素是经典的表示方法，常用在导航和地质勘察中，第二种地磁要素是船舶磁性防护技术中常用的表示方法，第三种地磁要素是地磁场建模和地球物理科学中常用的表示方法。实际上，三种方法可以互为转换，只要知道一种要素表示，其他两种要素的表示也就可以相应得到。各要素的定义及换算关系如表 8.1-1 所示。

表 8.1-1 地磁要素定义及换算关系

要素类型	要素名称	常用符号	定 义	换算关系
1	地磁总量	T	地磁场的大小	$T = \sqrt{H_X^2 + H_Y^2 + H_Z^2}$ $T = \sqrt{H_D^2 + Z_D^2}$
	磁偏角	D	地磁场在 XY 平面上的投影分量与 X 轴的夹角，投影分量偏东时 D 为正，偏西时 D 为负	$D = \arctan \frac{H_X}{H_Y}$
	磁倾角	I	地磁场与 XY 平面的夹角，地磁场向下时 I 为正，向上时 I 为负	$I = \arctan \frac{Z_D}{H_D}$
2	水平分量	H_D	地磁场在 XY 平面上的投影值	$H_D = T \cos I$ $H_D = \sqrt{H_X^2 + H_Y^2}$
	磁偏角	D	地磁场在 XY 平面上的投影分量与 X 轴的夹角，投影分量偏东时 D 为正，偏西时 D 为负	$D = \arctan \frac{H_X}{H_Y}$
	垂直分量	Z_D	地磁场在 Z 轴上的投影值	$Z_D = T \sin I$ $Z_D = H_Z$
3	X 分量	H_X	地磁场在 X 轴上的投影值	$H_X = T \cos I \cos D$
	Y 分量	H_Y	地磁场在 Y 轴上的投影值	$H_Y = T \cos I \sin D$
	Z 分量	H_Z	地磁场在 Z 轴上的投影值	$H_Z = T \sin I$

2.2 地球磁场分布特征

2.2.1 地磁场总体特征

地球磁场的磁力线如图 8.1-1 所示。地球磁场的总体特征类似于一个条形磁铁的磁性特征，磁力线从磁北极（N 极）出发，通过地球表面空间，终止于磁南极（S 极）。值得注意的是，地磁场的磁北极在地球的地理南极附近，磁南极在地球的地理北极附近；地磁南北极轴线和地理南北极轴线并不重合，有一约 15° 的夹角。

2.2.2 地磁场分布特征

地磁场总量的平均值约为 50 μ T (0.5Gs)；地磁场水平分量 H_D 永远为正（始终指向磁北极），在磁赤道处达到最大（约为 42 μ T），两个磁极处趋于零；地磁场垂直分量 Z_D 在地球南半球小于零（方向向上），在地球北半球大于零（方向向下），在磁赤道处为零，在两个磁极处幅值达到最大（约为 60~70 μ T）。

2.2.3 地磁场变化特性

经地磁长期观测表明，地球磁场存在短期变化和长期缓慢变化，前者主要包括地磁日变和磁暴，后者则由地核运动的改变产生。地磁短期变化的变化量级为数十纳特到数百纳特，尽管变化量级不足以影响船舶磁场量级，但有可能影响船舶磁场的测量，是高精度船舶磁场测量中必须考虑的因素。地磁长期变化的周期以年为单位计算，尽管此变化也不会影响船舶本身磁场特性，但是其长期的积累效应，特别是磁偏角的积累变化是固定消磁站建设中需要考虑的问题。

2.3 地磁图

为了导航、地球物理研究等需要，出版了不同比例的地磁图，船舶磁性防护技术也需要查阅地磁图。地磁图是在地球不同比例投影平面上描绘出一系列地磁要素的等强线图，常用的地磁图有地磁总强度图、地磁偏角图和地磁倾角图，船舶磁场防护技术中经常用到的是地磁水平分量图和地磁垂

直分量图。

由于地磁场的变化特征和勘测数据的不断积累更新,在各地磁要素图上还标示出不同地点地磁要素的“年变率”,而且也需不断更新,一般每十年更新一次。目前使用的是2000年版,由中国科学院地质与地球物理研究所编制。

2.4 地磁模式组

根据电磁场基本方程,可以得到地球磁场分布规律的通解数学表达式,然后利用观测资料求解通解公式中的相关系数,得到地球磁场的数学表达式,称为地磁模型或地磁模式组。目前存在三种形式的模式组,即中国地磁模式组、国际地磁参考场和世界地磁模型。

(1) 中国地磁模式组。中国地磁模式组是由中国科学院地质与地球物理研究所根据我国地磁台站和其他方法得到的观测资料,用“泰勒展开”数学方式建立适用于我国地区的地磁模型,目前有1990版和2000版,通常每隔10年更新一次。

(2) 国际地磁参考场(IGRF)。国际地磁参考场(IGRF)是国际地磁学与高空大气物理学会(IAGA)的研究小组根据收集的全球地磁观测资料建立的,以地球磁场的球谐展开多项式为通解表达式,然后根据测量数据求解展开系数,目前已求解出10阶展开系数。原理上它可以计算从地核到空间任何地方的地磁场,通常每隔5年更新一次,目前最新版本为IGRF 2005。

(3) 世界地磁模型(WMM)。世界地磁模型(WMM)是英国地质调查局(BGS)和美国地质调查局(USGS)联合研究推出的全球地磁模型,也是以地球磁场的球谐展开多项式为通解表达式,目前已求解出12阶展开系数。该模型广泛应用于空中和海上导航,英国国防部、美国国防部、北大西洋公约组织和世界水文组织等都将该模型作为导航和姿态确定参考系。模型从1990年以来,每隔5年更新一次,目前最新版本为WMM 2005。

随着观测手段越来越多,积累的数据越来越全面,地磁模式组的计算和预报精度将会越来越高,给空中和海上自动导航提供了有力的支撑。船舶磁性防护技术中利用地磁模型将会提高船舶磁场的控制范围和控制精度。目前先进海军国家均研制了基于地磁模型的消磁电流自动控制仪器,中国也进行了相关的研究,基于地磁模式组的消磁电流自动控制仪器已装备到部分船舶上。

3 船舶磁场分析方法

船舶磁场分析的目的是分离不同变化性质的磁场。在对船舶铁磁性磁场进行分类基础上,根据特殊的测量方法得到相应的计算公式。

3.1 船体的铁磁性特点

船体磁性的总体特点为:在应力、温度和强磁等外界因素作用下,船体材料先形成一相对应稳定的磁化点(对应磁滞回线上的剩磁点),然后在地球磁场的作用下,船体磁性通过该稳定点作线性变化。

3.1.1 船舶材料磁性起源

3.1.1.1 原子磁性起源

船舶钢材的磁性起源于原子中电子的两种不同运动,一种是绕原子核的运动,称为轨道运动,另一种是它自身的固有的运动,称为自旋运动。

3.1.1.2 磁畴结构

原子的磁矩在一定区域内是自发磁化的,在此区域内所

有原子的磁矩朝着同一个方向,该区域称为磁畴。铁磁物质由无数个这样的磁畴组成,其磁性决定于不同磁畴的大小和磁矩的排列方向。

3.1.1.3 磁化强度

某一方向上的磁化强度是各磁畴的自发磁化强度在该方向上投影的平均值,即

$$M = \sum_i^n M_s V_i \cos \theta_i \quad (8.1-8)$$

式中: n 为单位体积中磁畴的个数; V_i 为第 i 个磁畴的体积; θ_i 为该磁畴与外磁场之间的夹角。

3.1.1.4 技术磁化

由于铁磁物质在外磁场磁化过程中改变的是磁畴的大小和方向,为区别铁磁物质的自发磁化,将铁磁物质在外磁场中的磁化过程称为技术磁化。

3.1.2 船体钢材磁化特点

从材料磁性特点看,船体钢材属于铁磁性材料,其磁化规律具有铁磁性材料的所有特征,如磁滞特征和不可逆磁化特征等。一般船体钢材的相对起始磁化率在200~500之间,矫顽力在2~10Oe之间,属于“半硬半软”金属磁性材料。

3.1.3 影响船体磁性的因素

3.1.3.1 内禀磁特性

船舶钢材磁性的内禀特性,如起始磁化率 χ_i 、最大磁化率 χ_m 、矫顽力 H_c 、饱和磁化强度 M_s 等参数由材料的元素组成和结构决定,在钢材定型后就已经确定。

3.1.3.2 外部磁特性

(1) 影响船舶钢材外部固定磁特性(剩磁点)的主要因素有船体的形状、建造过程中的环境磁场和船台的方向、加工过程中形成的内部应力、较大风浪的打击、火灾、动力机械在某一地区长期运行和较大磁场的冲击等。外部固定磁性在一段时间内保持不变。

(2) 叠加在固定磁性上的磁性变化主要由地磁场产生,与船体钢材的矫顽力相比,地球环境磁场量级较小、船体在地磁场的作用下处在材料的“可逆磁化”阶段,船体磁场的变化与地球磁场为线性变化关系。

3.2 船舶磁场类型

根据船舶磁性的磁化特征,可以分为固定磁性和感应磁性,对应的船舶磁场称为固定磁场和感应磁场。由于船舶磁性和船舶磁场的矢量特性,又分解为船舶坐标系下的不同分量。

3.2.1 固定磁场和感应磁场

3.2.1.1 总磁化强度

用 $M(r)$ 表示船体内某点 r 的总磁化强度,则 $M(r)$ 可以分解为

$$M(r) = M_p(r) + M_i(r) \quad (8.1-9)$$

式中: $M_p(r)$ 为剩余磁化强度或“固定磁化强度”, $M_i(r)$ 为地磁场作用下产生的感应磁化强度。

3.2.1.2 固定磁化强度

$M_p(r)$ 固定只是相对的,其磁性大小由船舶的磁滞特性和应力、温度等因素决定,当经过不同的加工过程、航行经历和强磁场冲击后,固定磁性的大小还会发生改变。

3.2.1.3 感应磁化强度

$M_i(r)$ 为地磁场作用下产生的感应磁化强度,与地磁场 H_D 的关系为

$$M_i(r) = \chi_i(r) H_D \quad (8.1-10)$$

式中: $\chi_i(r)$ 为 r 点的磁化率。

3.2.1.4 固定磁场和感应磁场

固定磁性 $M_p(r)$ 对应的船舶磁场称为固定磁场, 感应磁性 $M_i(r)$ 对应的船舶磁场称为感应磁场。

3.2.1.5 磁感应强度与磁化强度的关系

磁感应强度与磁化强度的关系为

$$B_p = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \left[\frac{3(M_p \cdot R)R}{R^5} - \frac{M_p}{R^3} \right] d\tau \quad (8.1-11)$$

$$B_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \left[\frac{3(M_i \cdot R)R}{R^5} - \frac{M_i}{R^3} \right] d\tau \quad (8.1-12)$$

其中积分范围为船体钢材内部, R 为积分源点到计算场点的位置矢量。

3.2.2 船舶磁场分量

由于船舶磁性和船舶磁场的矢量特性, 应在一定的坐标系下进行分解, 以利于对磁场的分量特性进行研究和采取相应的防护措施。

3.2.2.1 船舶坐标系

一般选取船舶坐标系进行分解, 船舶磁性防护技术中船舶坐标系的选取方式是, 以船舶的标准水准线所处的平面为 XY 面, X 轴在船舶左右对称的纵剖面上, 指向船艏方向为正, Y 轴在船舶的船尾舯横截面上, 指向右舷方向为正, Z 轴向下与 XY 轴一起构成右手坐标系, 如图 8.1-3 所示。

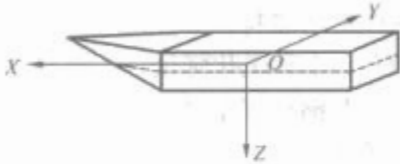


图 8.1-3 磁防护中的船舶坐标系

3.2.2.2 磁性分量

将固定磁性 $M_p(r)$ 和感应磁性 $M_i(r)$ 在船舶坐标系下分

解, 共有 6 个分量, 每个分量都有相应的专业名称:

(1) 固定磁性的 3 个分量依次称为纵向固定磁性 PLM、横向固定磁性 PAM 和垂向固定磁性 PVM;

(2) 感应磁性的 3 个分量依次称为纵向感应磁性 ILM、横向感应磁性 IAM 和垂向感应磁性 IVM。

3.2.2.3 磁性分量磁场

每个磁性分量类似一个条形磁铁, 它们在空间产生的磁场也形成矢量场, 在船舶坐标系下可以分解为 3 个投影分量。这样, 6 种分量磁性就分解形成了船舶磁场的 18 个分量, 每个分量按照其磁性来源和分量性质对应一个专业名称, 如图 8.1-4 中间部分所示。

3.2.2.4 固定和感应磁场分量

从船舶磁场角度看, 也可以将船舶磁场分为固定磁场和感应磁场, 每种磁场具有 3 个分量, 它们与船舶磁性的关系为:

(1) X 分量固定磁场 (或称为固定磁场 X 分量) 是 3 个固定磁性分量形成的磁场 X 分量的合成磁场。

(2) Y 分量固定磁场 (或称为固定磁场 Y 分量) 是 3 个固定磁性分量形成的磁场 Y 分量的合成磁场。

(3) Z 分量固定磁场 (或称为固定磁场 Z 分量) 是 3 个固定磁性分量形成的磁场 Z 分量的合成磁场。

(4) X 分量感应磁场 (或称为感应磁场 X 分量) 是 3 个感应磁性分量形成的磁场 X 分量的合成磁场。

(5) Y 分量感应磁场 (或称为感应磁场 Y 分量) 是 3 个感应磁性分量形成的磁场 Y 分量的合成磁场。

(6) Z 分量感应磁场 (或称为感应磁场 Z 分量) 是 3 个感应磁性分量形成的磁场 Z 分量的合成磁场。

船舶磁性各分量与船舶磁场各分量的关系如图 8.1-4 所示。

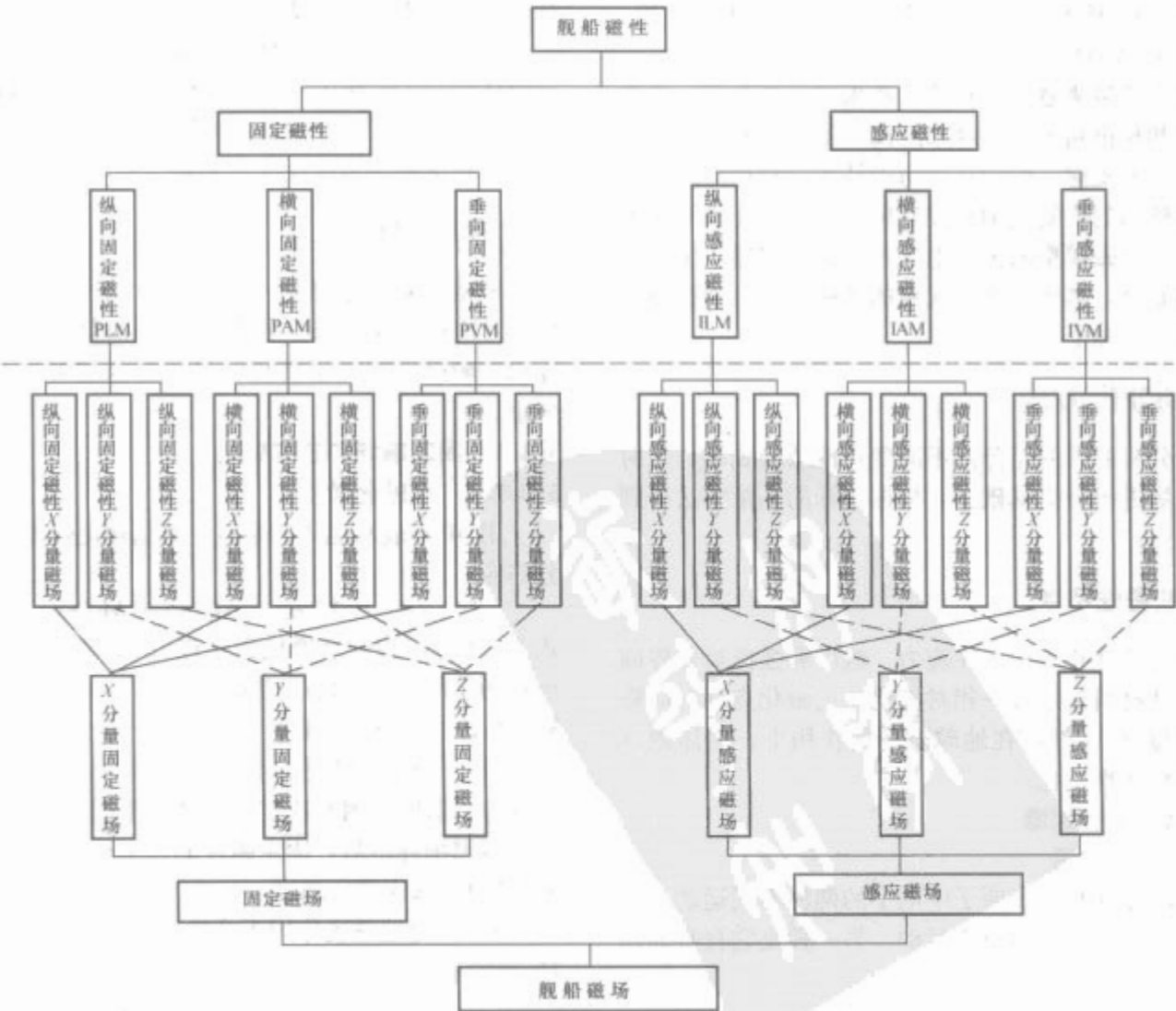


图 8.1-4 船舶磁场分解示意图

3.3 船舶磁场分析方法

3.3.1 船舶磁场分量表示

3.3.1.1 符号表示

船舶磁场分量的符号表示如图 8.1-5 所示,方法为用 X 、 Y 、 Z 直接表示磁场分量;如果要表示磁场分量的来源,则用一个下标字符标识,表示该磁场分量来源的磁性类型,如果要进一步表示磁场分量来源磁性属性的分量,则用另一下标 (x 、 y 、 z) 标识。图 8.1-5 表示的是纵向固定磁性 X 分量磁场 X_{px} 。

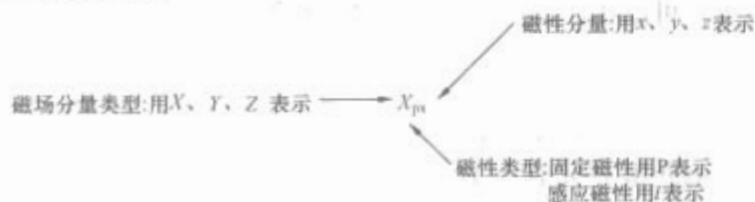


图 8.1-5 船舶磁场分量的表示方法

3.3.1.2 数学分解表达式

按照上述分解方法,船舶磁场分解关系可以用下列公式表示

$$B = X_i + Y_j + Z_k \quad (8.1-13)$$

$$X = X_p + X_i = X_{px} + X_{py} + X_{pz} + X_{ix} + X_{iy} + X_{iz} \quad (8.1-14)$$

$$Y = Y_p + Y_i = Y_{py} + Y_{px} + Y_{pz} + Y_{ix} + Y_{iy} + Y_{iz} \quad (8.1-15)$$

$$Z = Z_p + Z_i = Z_{pz} + Z_{py} + Z_{px} + Z_{ix} + Z_{iy} + Z_{iz} \quad (8.1-16)$$

3.3.2 船舶磁场 Z 分量和航向差

3.3.2.1 磁场 Z 分量

目前,船舶磁性防护主要是针对船舶磁场的 Z 分量进行防护(因为 X 、 Y 、 Z 对应分量均来自船舶磁性的相同磁性分量,所以原理上 Z 分量减小的同时, X 、 Y 分量也会相应减少),所以对 Z 分量的分析及其重要(如无特别说明,本篇中船舶磁场均指船舶磁场的 Z 分量)。

(1) Z_{px} 、 Z_{py} 和 Z_{pz} 分别称为船舶磁场纵向固定磁场、横向固定磁场和垂向固定磁场。

(2) Z_{ix} 、 Z_{iy} 和 Z_{iz} 分别称为船舶磁场纵向感应定磁场、横向感应磁场和垂向感应磁场。

3.3.2.2 航向差

Z_{ix} 和 Z_{iy} 在同一地点随着船舶航向而改变,磁北航向上的 Z_{ix} 和磁西航向上船舶右舷上的 Z_{iy} , 分别称为纵向航向差和横向航向差。之所以称为航向差是因为它们可以用不同航向磁场测量值的差值得到。

3.3.3 船舶感应磁场分离方法

3.3.3.1 基本假设

能够对船舶磁场进行分解的基本假设是:

(1) 船舶的固定磁场在测量过程中不发生变化。

(2) 感应磁场分量与作用到船舶上的地磁场分量成正比。

(3) 同一地区的地球磁场在测量过程中保持不变或其变化不影响船舶磁性。

3.3.3.2 基本方法

通过改变船舶航向、改变测量地点或施加全船范围内均匀的环境磁场,使地磁场对船舶的作用分量发生变化(导致感应磁场分量发生改变);通过测量不同地磁场作用前后的船舶磁场,结合地磁场的变化关系分解相应的感应磁场

分量。

3.3.3.3 感应磁场与地磁场的关系

感应磁场与地球磁场的一般关系可以表示为

$$\begin{aligned} Z_{ix}(x, y, z) &= K_{xz}(x, y, z) H_x \\ Z_{iy}(x, y, z) &= K_{yz}(x, y, z) H_y \\ Z_{iz}(x, y, z) &= K_{zz}(x, y, z) H_z \end{aligned} \quad (8.1-17)$$

式中: $K_{xz}(x, y, z)$ 、 $K_{yz}(x, y, z)$ 、 $K_{zz}(x, y, z)$ 分别称为纵向磁化垂向感应磁场传递函数、横向磁化垂向感应磁场传递函数和垂向磁化垂向感应磁场传递函数,由船舶的形状以及船舶的磁化性质决定。 H_x 、 H_y 、 H_z 分别为地球磁场在船舶坐标系下的投影分量。

3.3.3.4 感应磁场与航向的关系

(1) 当船舶保持水平状态,地磁场在船舶坐标系下的投影分量为

$$\begin{aligned} H_x &= H_D \cos \varphi \\ H_y &= H_D \sin \varphi \\ X_z &= Z_D \end{aligned} \quad (8.1-18)$$

式中: H_D 和 Z_D 分别为地球磁场的水平分量和垂直分量; φ 为船舶的磁航向角。

(2) 由式 (8.1-17) 和式 (8.1-18) 知,船舶水平情况下感应磁场与航向的关系为

$$\begin{aligned} Z_{ix} &= \frac{Z_{ixm}}{H_{Dm}} H_D \cos \varphi = Z_{ix}^N \cos \varphi \\ Z_{iy} &= \frac{Z_{iym}}{H_{Dm}} H_D \sin \varphi = Z_{iy}^W \sin \varphi \\ Z_{iz} &= \frac{Z_{izm}}{Z_{Dm}} Z_D = Z_{iz} \end{aligned} \quad (8.1-19)$$

3.3.3.5 航向差的分离方法

(1) 通过某地船舶 4 个磁主航向(磁东 $\varphi = \pi/2$ 、磁南 $\varphi = \pi$ 、磁西 $\varphi = 3\pi/4$ 和磁北 $\varphi = 0$) 的测量值 $Z^E(x, y, z)$ 、 $Z^S(x, y, z)$ 、 $Z^W(x, y, z)$ 和 $Z^N(x, y, z)$, 由于固定磁场和垂向感应磁场不随航向变化,而根据式 (8.1-19), 4 个磁主航向上的纵向感应磁场和横向感应磁场具有下列关系

$$\begin{aligned} Z_{ix}^E(x, y, z) &= Z_{ix}^W(x, y, z) = 0, Z_{ix}^S(x, y, z) \\ &= -Z_{ix}^N(x, y, z) \end{aligned} \quad (8.1-20)$$

$$\begin{aligned} Z_{iy}^S(x, y, z) &= Z_{iy}^N(x, y, z) = 0, Z_{iy}^E(x, y, z) \\ &= -Z_{iy}^W(x, y, z) \end{aligned} \quad (8.1-21)$$

(2) 用磁南和磁北两个航向的磁场计算该地的纵向航向差

$$Z_{ix}^N(x, y, z) = \frac{Z^N(x, y, z) - Z^S(x, y, z)}{2} \quad (8.1-22)$$

(3) 用磁东和磁西两个航向的磁场测量分离出该地的横向航向差

$$Z_{iy}^W(x, y, z) = \frac{Z^W(x, y, z) - Z^E(x, y, z)}{2} \quad (8.1-23)$$

(4) 有时由于条件限制,不能进行四个主航向上的测量,这时可以用相互垂直的两个主航向上的测量值,或任意航向及其与该航向相反航向上的测量,结合船舶的对称性假设来进行航向差的分离,计算公式和假设条件见表 8.1-2。

(5) 即使利用 4 个主航向上的测量值,有时为了消除一定的测量误差,也要利用船舶的对称性进行分离,将具有对称性的磁场进行平均处理,见表 8.1-2。

表 8.1-2 船舶磁场航向差分离计算公式

类型	分量	航向	公 式	对称假设条件 ^①
I	$Z_{ix\text{左}}$	N. S	$(Z_{\text{左}}^N - Z_{\text{左}}^S)/2$	
		N. E	$Z_{\text{左}}^N - Z_{\text{左}}^E$	a
		N. W	$Z_{\text{左}}^N - Z_{\text{左}}^W$	a
		E. S	$Z_{\text{左}}^E - Z_{\text{左}}^S$	a
		W. S	$Z_{\text{左}}^W - Z_{\text{左}}^S$	a
	$Z_{ix\text{右}}$	N. S	$[(Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^N - (Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^S]/4$	a
		N. E	$[(Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^N - (Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^E]/2$	a
		N. W	$[(Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^N - (Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^W]/2$	a
		E. S	$[(Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^E - (Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^S]/2$	a
		W. E	$[(Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^W - (Z_{\text{右}} + Z_{\text{左}})^S]/2$	a
II	$Z_{iy\text{右}}$	W. E	$[(Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^W - (Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^E]/4$	a
		W. E	$(Z_{\text{右}}^W - Z_{\text{左}}^E)/2$	
		W. N	$[(Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^W - (Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^N]/2$	a
		W. S	$[(Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^W - (Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^S]/2$	a
		N. E	$[(Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^N - (Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^E]/2$	a
		S. E	$[(Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^S - (Z_{\text{右}} - Z_{\text{左}})^E]/2$	a

① a 为舰船磁场左右对称假设。

3.3.3.6 垂向感应磁场的分离方法

(1) 垂向感应磁场 $Z_{iz}(x, y, z)$ 不可能在同一地点通过航向的改变进行分离, 只能靠两个不同地点的测量 (改变地磁场垂向分量 Z_D) 或人为改变垂向环境磁场的方法进行测量。

(2) 设改变的垂向地磁场大小为 ΔZ_D , 则通过同一航向的两次测量值分离计算公式为

$$Z_{iz}(x, y, z) = \frac{Z_z^2(x, y, z) - Z_z^1(x, y, z)}{\Delta Z_D} Z_D \quad (8.1-24)$$

3.3.3.7 感应磁场的异地换算

当得到某地 1 的感应磁场后, 可以根据地磁场磁化的线性性质得到其它地方 2 的感应磁场

$$\begin{aligned} Z_{ix}^2(x, y, z) &= Z_{ix}^1(x, y, z) \frac{H_D^2}{H_D^1} \\ Z_{iy}^2(x, y, z) &= Z_{iy}^1(x, y, z) \frac{H_D^2}{H_D^1} \\ Z_{iz}^2(x, y, z) &= Z_{iz}^1(x, y, z) \frac{Z_D^2}{Z_D^1} \end{aligned} \quad (8.1-25)$$

3.3.4 船舶固定磁场分离方法

3.3.4.1 对称性假设

目前只能借助船舶的对称性假设对固定磁场分量进行分解。用左右对称假设分离 Z_{py} , 用船尾对称假设分离 Z_{px} , 在两者都假设情况下分离 Z_{pz} 。

3.3.4.2 左右对称分离 Z_{py}

(1) 通常认为船舶的左右是对称的, 导致 Z_x 和 Z_z 左右对称, Z_y 左右反对称 [龙骨线下的 $Z_{py}(x, 0, z) = 0$], 数学表示为

$$\begin{aligned} Z_{ix}(x, y, z) &= Z_{ix}(x, -y, z), Z_{px}(x, y, z) = Z_{px}(x, -y, z) \\ Z_{iy}(x, y, z) &= Z_{iy}(x, -y, z), Z_{py}(x, y, z) = Z_{py}(x, -y, z) \end{aligned} \quad (8.1-26)$$

$$Z_{pz}(x, y, z) = Z_{pz}(x, -y, z), Z_{pz}(x, y, z) = Z_{pz}(x, -y, z)$$

(2) 在此假设下, 可以通过船舶左、右舷的磁场测量值分离船舶的横向固定磁场 Z_{py} :

1) 例如, 北航向上右舷 Z_{py} 的分离公式为

$$Z_{py\text{右}} = Z_{py}(x, b/2, z) = \frac{Z(x, b/2, z)^N - Z(x, -b/2, z)^N}{2} \quad (8.1-27)$$

式中: $b/2$ 为右舷某点的横坐标。

2) 实际上, 当船舶的横向航向差 Z_{iy}^W 已经分离出的情况下, 可以在任意航向 φ 上通过两舷磁场的测量得到 Z_{py}

$$Z_{py\text{右}} = Z_{py}(x, b/2, z) = \frac{Z(x, b/2, z)^\varphi - Z(x, -b/2, z)^\varphi}{2} - Z_{iy}^W(x, b/2, z) \sin \varphi \quad (8.1-28)$$

由此得到其他航向上的分离 Z_{py} 的计算公式, 见表 8.1-3。

3.3.4.3 船尾对称假设分离 Z_{px}

(1) 在有些情况下, 为了分析船舶纵向固定磁场, 可以近似认为船舶磁场是船尾对称的, 导致 Z_x 船尾反对称 [舯横截面下的 $Z_{px}(0, y, z) = 0$], Z_y 和 Z_z 船尾对称, 数学表示为

$$\begin{aligned} Z_{ix}(x, y, z) &= -Z_{ix}(-x, y, z), Z_{px}(x, y, z) = -Z_{px}(-x, y, z) \\ Z_{iy}(x, y, z) &= Z_{iy}(-x, y, z), Z_{py}(x, y, z) = Z_{py}(-x, y, z) \\ Z_{pz}(x, y, z) &= Z_{pz}(-x, y, z), Z_{pz}(x, y, z) = Z_{pz}(-x, y, z) \end{aligned} \quad (8.1-29)$$

(2) 在此假设下, 可以通过船舶的船尾对应点的磁场测量, 得到船舶的纵向固定磁场 Z_{px}

1) 例如, 东航向上船部某点的 Z_{px} 分离公式为

$$Z_{px\text{船}} = Z_{px}(l/2, y, z) = \frac{Z(l/2, y, z)^W - Z(-l/2, y, z)^W}{2} \quad (8.1-30)$$

式中: $l/2$ 为船部某点的纵坐标。

2) 当船舶的纵向航向差 Z_{ix}^N 已经分离出的情况下, 可以在任意航向 φ 上通过船尾磁场的测量得到 Z_{px}

$$\begin{aligned} Z_{px\text{船}} &= Z_{px}(l/2, y, z) \\ &= \frac{Z(l/2, y, z)^\varphi - Z(-l/2, y, z)^\varphi}{2} - Z_{ix}^N \cos \varphi \end{aligned} \quad (8.1-31)$$

由此得到其他航向上的分离 Z_{px} 的计算公式见表 8.1-3。

3.3.4.4 左右和船尾对称假设分离 Z_{pz}

在两者均假设成立条件下, 由于船舶磁场 6 个分量已经分离, 船舶的垂向固定磁场 Z_{pz} 自然可以表述为

$$\begin{aligned} Z_{pz}(x, y, z) &= Z(x, y, z) - Z_{ix}(x, y, z) \\ &\quad - Z_{px}(x, y, z) - Z_{iy}(x, y, z) \\ &\quad - Z_{py}(x, y, z) - Z_{iz}(x, y, z) \end{aligned} \quad (8.1-32)$$

3.3.4.5 固定磁场分离新方法

(1) 一般情况下, 水面航行的船舶船尾对称假设是不合理的, 因此在具体分析船舶磁场数据时不能使用, 只是有时用来进行定性分析。

(2) 在 Z_{iz} 无法分离情况下, 一般只能分离 Z_{ix} 、 Z_{iy} 、 Z_{py} 和 $Z_z + Z_{px}$ 磁场分量, 见表 8.1-4。

(3) 在不作对称性假设和不进行两地测量条件下, 分离 Z_{py} 并进一步从 $Z_z + Z_{px}$ 中将 Z_{iz} 、 Z_{pz} 和 Z_{px} 分离出来是目前船舶磁性防护技术中正在解决的难题。

1) 一方面通过现代消磁站增加垂向地磁模拟线圈, 模拟产生垂向地磁场的变化, 以便分离 Z_{iz} 。

2) 另一方面则是通过物体磁化和电磁场理论,从理论上进行计算,以得到相应的固定磁场分量。

表 8.1-3 船舶固定磁场分量分离计算公式

类型	分量	航向	公 式	对称假设条件①
III	$Z_{py右}$	N	$(Z_{右}-Z_{左})^N/2$	a
		S	$(Z_{右}-Z_{左})^S/2$	a
		W	$(Z_{右}-Z_{左})^W/2-Z_{iy}$	a
		E	$(Z_{右}-Z_{左})^E/2+Z_{iy}$	a
		E, W	$[(Z_{右}-Z_{左})^E+(Z_{右}-Z_{左})^W]/4$	a
IV	$Z_{px左}$	E	$(Z_{船}-Z_{舰})^E/2$	b
		W	$(Z_{船}-Z_{舰})^W/2$	b
		N	$(Z_{船}-Z_{舰})^N/2-Z_{ix左}$	b
		S	$(Z_{船}-Z_{舰})^S/2+Z_{ix左}$	b
		N, S	$(Z_{船}-Z_{舰})^N+(Z_{船}-Z_{舰})^S/4$	b
	$Z_{px右}$	E	$[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^E-(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^E]/4$	a 且 b
		W	$[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^W-(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^W]/4$	a 且 b
		N, S	$\{[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^N-(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^N]+[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^S-(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^S]\}/8$	a 且 b

① a 为舰船磁场左右对称假设;
b 为舰船磁场船艏对称假设。

表 8.1-4 船舶部分合成磁场分离计算公式

类型	分量	航向	公 式	对称假设条件①
V	$Z_{x左}$	E	$Z_{左}^E-Z_{px左}$	a
		W	$Z_{左}^W-Z_{px左}$	a
		N	$Z_{左}^N-Z_{px左}-Z_{ix左}$	a
		S	$Z_{左}^S-Z_{px左}+Z_{ix左}$	a
		N, S	$[(Z_{船}+Z_{舰})^N+(Z_{船}+Z_{舰})^S]/4$	a 且 b
	$Z_{x右}$	E	$[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^E+(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^E]/4$	a 且 b
		W	$[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^W+(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^W]/4$	a 且 b
		N	$[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^N+(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^N]/4$	a 且 b
		S	$[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^S+(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^S]/4$	a 且 b
		N, S	$\{[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^N+(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^N]+[(Z_{右}+Z_{左})_{船}^S+(Z_{右}+Z_{左})_{舰}^S]\}/8$	a 且 b
VI	$(Z_x+Z_{px})_{左}$	E	$Z_{左}^E$	a
		W	$Z_{左}^W$	a
		N	$Z_{左}^N-Z_{ix左}$	a
		S	$Z_{左}^S+Z_{ix左}$	a
		N, S	$(Z_{左}^N+Z_{左}^S)/2$	a
	$(Z_x+Z_{px})_{右}$	E	$(Z_{右}+Z_{左})^E/2$	a
		W	$(Z_{右}+Z_{左})^W/2$	a
		N	$(Z_{右}+Z_{左})^N/2-Z_{ix右}$	a
		S	$(Z_{右}+Z_{左})^S/2+Z_{ix右}$	a

① a 为舰船磁场左右对称假设;
b 为舰船磁场船艏对称假设。

4 船舶磁场防护技术

(1) 船舶磁性防护要求。对某型船舶磁性防护技术的使用与该型船舶磁性防护要求是密不可分的。船舶磁性防护要求应根据下述因素综合考虑。

- 1) 船舶的使命任务。
- 2) 船舶的航行区域。
- 3) 敌方水中兵器现状。
- 4) 现有技术和工艺条件。
- 5) 造价及经济承受能力。

(2) 全寿命磁性防护。船舶磁性防护技术贯穿于船舶的整个生命周期中,从设计,建造到使用维护。每个阶段虽然侧重点不同,采用的技术也不相同,但对船舶的最终防护性能会互相影响。特别是设计阶段,它所采取的船体的磁性防护措施和设备、它所依赖的为船体磁性防护配套的措施和设备,决定了船舶服役期间相应技术的实施和最终的磁性防护性能。

本节仅简要介绍不同特性磁场的防护技术,详细的原理方法和控制设备原理在本篇相关章节中介绍。

4.1 钢铁船舶磁性防护技术

钢铁船舶的磁场主要来源于船体的铁磁性磁场,铁磁性磁场可以分解为固定磁场和感应磁场,由于两者的变化性质不同,所以采取的技术方法不同。

4.1.1 固定磁场防护技术

4.1.1.1 磁中性状态和固定磁性消磁

(1) 从磁畴观点看,在理想的“磁中性状态”下,物体内部各磁畴的方向分布为各向同性,使得磁化强度在空间任何方向的投影合成为零。如图 8.1-6 所示。

(2) 固定磁场来源于船舶铁磁性材料的剩磁,如果能够改变材料的剩磁点,则可以改变船舶的固定磁场。

如果使铁磁材料处在磁化曲线的“磁中性点”,则对应的固定磁场就会被消除,称为固定磁性消磁。

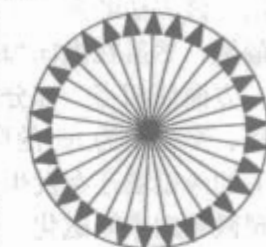


图 8.1-6 理想磁中性状态磁畴角分布

4.1.1.2 两种固定磁性消磁方法

有两种消除铁磁物质剩磁的方法,一种是热消磁,另一种是电流磁场消磁。

(1) 热消磁方法是把被消磁的样品加热到居里点之上,破坏铁磁物质的磁畴结构而使其处于顺磁态,然后在没有外磁场的条件下让它慢慢冷却。这样便可得到各磁畴在空间各方向上的均匀分布而达到磁中性状态。这种方法虽然可以把材料的宏观磁性消除,但在工艺上不易实行,而且经过高温处理后,往往会使材料的其他性能受到破坏。因此在一般情况下不被采用。

(2) 电流磁场消磁是对铁磁物体施加不同的磁场进行退磁处理,施加的磁场由通电线圈产生。按照电流的性质,电流磁场消磁又分成直接抵消法、交流消磁法两种方法。

1) 直接抵消法可用于对大型铁磁物体和高矫顽力的永久磁铁的消磁。在剩磁的反方向加一个比矫顽力 H_c 大的磁场,使外磁场方向的总磁矩略大于剩磁方向的总磁矩。然后去掉外磁场,一部分磁畴又回到剩磁方向。结果使外磁场方向的磁矩恰好抵消剩磁方向的磁矩。实施过程中磁畴的空间分布如图 8.1-7 所示。不难看到这种消磁结果并未使被消磁的对象恢复到真正的磁中性状态,因而消磁结果稳定性较差。

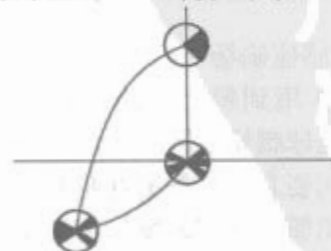


图 8.1-7 直接抵消法磁畴的角分布

2) 交流消磁法是目前使用最普遍且行之有效的方法,在船舶消磁中称为综合消磁。这种消磁方法的原理是把被消磁的对象放在没有任何恒定磁场分量的环境中,然后用初始幅值足够强、振幅逐渐衰减至零的交变磁场进行作用,使其磁性对外显示为零。目前的交流消磁法只能在一个方向施加工作磁场,称为单向交流消磁,导致物体内部的磁畴角分布形成图 8.1-8 所示,在工作磁场方向的对称分布,而与之垂直的两个方向上无磁畴角分布,也是一种准磁中性状态。

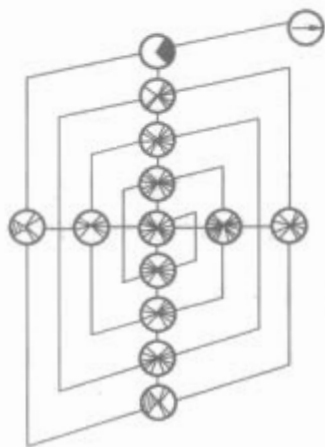


图 8.1-8 交流消磁中磁畴角分布变迁过程

3) 为了进一步提高磁畴的分布均匀性,对小样品,可以在实施交流磁场的同时,使样品不停地旋转。对于船舶这样的大型物体,提出了一种称为混合颠倒消磁法的交流消磁方法。该方法的第一步是在垂直方向加一个反向磁场,使剩磁颠倒,然后在纵向加振幅衰减的交变磁场。这样的交变磁场一方面使相当一部分磁畴比较均匀地分布在以船的首尾线为轴、半张角为 55° 的两个圆锥体之内,另一方面由于垂直向下的地磁场还在发生作用,纵向的交变磁场帮助它在垂向实现微弱的中间磁化。使原来与它成近 180° 的一部分磁畴反转到与它接近的方向上来,如图 8.1-9 所示。

4) 用电流消磁法消除或改变船舶的固定磁性称为船舶磁性处理或船舶固定磁场消磁,一般在专门的消磁场地,通过消磁站设备或消磁船设备进行,对场地环境、工作磁场制式和地磁补偿磁场精度都有严格的要求,具体实施原理和设备工艺要求见本篇第 3 章。



图 8.1-9 混合颠倒消磁的磁畴角分布

4.1.1.3 固定磁场的补偿和调整

(1) 目前仅依靠船舶固定磁场消磁技术难以将固定磁场完全消除,固定磁场的剩余部分由船舶消磁系统进行补偿。

(2) 利用固定磁场消磁技术,将船舶固定磁场(特别是固定磁场垂向分量)整理到一定值(而不是消除),以利于未安装消磁系统或只安装轻型消磁系统船舶的磁性防护。

4.1.2 感应磁场防护技术

4.1.2.1 用船载消磁系统补偿感应磁场

(1) 由于船舶感应磁场与作用到船上的地球磁场成正比,当船舶处于不同地点时,地球磁场不同。即使在同一地点,当船舶处于不同航向和不同姿态时,投影到船舶坐标系下的磁场分量也会不同,导致船舶的感应磁场发生变化。所以,船舶的感应磁场不能像固定磁场那样“消除”,而只能通过船载消磁系统进行“补偿”。

(2) 船载消磁系统补偿船舶磁场的方法是,在船舶内部敷设不同形式的消磁绕组,在消磁绕组中通过一定大小电流,使其在船外空间产生相应磁场。要求消磁绕组通电后在船外空间产生的磁场形状与船舶被补偿的磁场形状一致,大小与被补偿的磁场相同,方向与被补偿的磁场相反。

1) 根据船舶磁场类型和船舶磁场防护要求确定船舶消磁绕组类型。

2) 船舶绕组类型、在船舶上的敷设位置和相对安匝分布决定产生的磁场形状。

3) 绕组中通电电流大小和方向决定补偿磁场的大小和方向。

4) 感应磁场补偿绕组中的消磁电流大小和方向的调节信号与作用在船舶上的地球磁场分量相一致。

4.1.2.2 感应消磁电流与船舶姿态的关系

(1) 设某航行海域地磁场水平分量为 H_D 、垂直分量为 Z_D 、磁偏角为 D 、船舶的航向角为 ψ 、纵倾角为 α 、横倾角为 β ,则作用在船舶坐标系上的地磁场分量(h_x , h_y , h_z)为

$$h_x = \cos\alpha\cos\varphi H_D + \sin\alpha Z_D \quad (8.1-33)$$

$$h_y = -(\sin\alpha\sin\varphi\cos\varphi + \cos\beta\sin\varphi) H_D + \cos\alpha\sin\beta Z_D \quad (8.1-34)$$

$$h_z = -(\sin\alpha\cos\beta\cos\varphi - \sin\beta\sin\varphi) H_D + \cos\alpha\cos\beta Z_D \quad (8.1-35)$$

式中: $\varphi = \psi - D$, 为船舶的磁航向角(船舶与地磁场水平分量的夹角)。

(2) 设感应磁场补偿绕组为串联集中供电,则纵向感应补偿电流 I_x 、横向感应补偿电流 I_y 和垂向感应补偿电流与地磁场分量的关系为

$$I_x = B_x h_x, I_y = B_y h_y, I_z = B_z h_z \quad (8.1-36)$$

式中: B_x 、 B_y 、 B_z 为地磁场与消磁电流的比例常数(或传递系数),由船舶感应磁场大小和消磁绕组设计参数确定。

4.1.2.3 船舶消磁系统组成

船舶消磁系统主要由消磁绕组、消磁电源和消磁电流调整器(或称消磁电流控制器)组成。

(1) 消磁绕组是船舶消磁系统的核心。根据船舶的磁性防护要求,选用不同的绕组形式、布设位置以及调整方式。消磁绕组设计涉及到船舶的设计、建造和磁性调整各个阶段,其设计方法和技术要求详见本篇第 4 章。

(2) 消磁电源根据消磁电流调整器的控制信号向消磁绕组提供高精度、低纹波系数的可调直流电,其功率大小和供电方式由消磁系统总体设计方案决定。随着电力电子技术的发展,消磁电源不断在更新发展,目前不同船型使用了多种消磁电源,具体原理介绍和技术要求见本篇第 5 章。

(3) 消磁电流调整器根据获得的地球磁场信号,根据式(8.1-36)向消磁电源提供电流控制信号。如何获得地磁场的投影分量一直是船舶消磁控制设备的难点,船舶消磁控制设备的专用控制技术研究基本上是围绕这一核心展开的,其他技术的发展是随电力电子技术和计算机技术水平的发展而不断更新的。具体原理介绍和技术要求见本篇第 6 章。

4.1.2.4 地磁场控制信号来源

尽管世界各国船舶消磁控制设备种类繁多,但从如何得到船舶坐标系下船舶磁场分量看,可以分为三类:查阅地磁图方法、磁场传感器方法和地磁场解算方法。

(1) 查阅地磁图方法(罗经控制方式)。

1) 所谓查阅地磁图方法,就是根据地磁图查阅不同地区地磁场参数,列成表格备查。当船舶航行到某区域时,根

据当地地磁场数据和船舶的航向,实施半自动消磁电流调节,即Z方向消磁电流和X、Y方向消磁电流最大幅值是手动调整,而X、Y方向消磁电流随船舶航向变化是自动调节(其航向信号来自电罗经,所以通常称为罗经控制方式)。

2) 这类控制设备的优点是性能可靠,缺点是不能实现全自动控制,且大多数设备不能随船舶姿态的变化进行电流调节。

(2) 磁场传感器方法(磁强计控制方式)。

1) 磁场传感器方法就是在船舶桅杆上安装三分量磁场传感器,通过直接测量作用到船舶上的地球磁场,对三个方向的消磁电流进行控制。

2) 该类控制设备的优点是除能够对船舶不同位置、不同航向和不同姿态进行消磁电流自动调节外,还能对局部地磁异常区域和地磁变化进行调节,缺点是抗干扰调整问题难以解决。

(3) 地磁解算方法。

1) 地磁解算方法是根据船舶所在位置,利用“地磁模式组”数学方法计算当地地球磁场,根据船舶的航向和姿态计算投影到船舶坐标系上的地磁分量,实施对消磁系统电流的全自动控制。

2) 这类控制设备的优点是既能实现全自动调整,又不需要进行复杂的抗干扰调整,且由于使用了计算机系统,能方便地实现分布式消磁电源控制和消磁系统的智能调整和监控,缺点是不能对变化的地磁场和局部异常地磁场作出反应,电流控制精度决定于“地磁模式组”的计算精度。在经过多年地球物理研究和测量数据基础上,地球模式组精度已经能够满足船舶消磁系统控制要求。

4.1.2.5 分布式消磁系统

(1) 目前,大多数消磁系统采用消磁绕组区段串联、集中供电方式,如图8.1-10所示。在保持消磁电流大小不变条件下,通过消磁绕组接线箱将某一区段绕组反接,改变匝数方式调整绕组的磁场形状。这种方式的优点是集中控制的电源数量少,绕组电阻保持不变,控制方便。缺点是绕组质量增加(因无法提高电源电压和选用高压电缆,电缆截面选用较粗,保证电阻值在一定小范围内)、绕组调整困难(只能改变匝数)和无法实现自动绕组调整,在某一区段绕组受损时,整个消磁绕组不能使用。



图 8.1-10 区段串联、集中供电方式消磁系统

(2) 对于一些特殊的船舶消磁系统,采取了区段独立供电、多路电源集中控制的方式。由于这些船舶的船体采用低磁或无磁材料建造,且船型较小,消磁电流和单路功率一般很小,采取集中控制方式有利于电源维护管理,各区段绕组电缆到电源的电源线也不会太粗太重。

(3) 分布式消磁系统是国外近年来才提出并装备到大型船舶上的。绕组的每个区段用一个安装在其附近的独立电源供电,通过改变电流大小来调整磁场,如图8.1-11所示。这种供电方式将大量减轻消磁系统质量,能够实现部分消磁绕组受损时的重构和实现自动调整。分布式消磁系统是建立在消磁系统控制设备能够实现计算机信息处理、远程实时通信和分布式控制技术基础上的,对分布在全船的消磁电源的可靠性和电磁兼容性也提出了更高的要求。

4.1.2.6 闭环消磁技术

(1) 依据地球磁场进行消磁电流自动调节只是从原理上对船舶的感应磁场进行自动补偿,而固定磁场补偿电流设定后保持不变。然而,固定磁场的不变只是相对的,当船舶经过大的风浪冲击、武器发射、潜艇的水下航行、动力设备的运行等过程后,船舶的固定磁性将会发生变化。现有消磁系统没有考虑这一部分的磁场变化,从船舶的磁性变化没有参与船舶磁性控制上讲,是一种开环控制系统。

(2) 闭环消磁控制就是在船体上安装若干磁场传感器,实时检测船舶磁性变化并实施控制。这种技术目前是国际上船舶消磁的重点研究内容之一。主要技术涉及船舶磁场实时检测、船体表面磁场与空间磁场变化关系、船舶内外磁场换算关系、多点和多信号融合分析等。

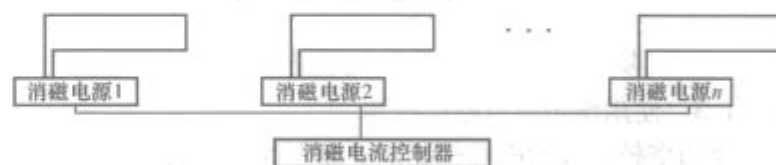


图 8.1-11 分布式消磁系统

4.2 特殊船舶磁性防护技术

(1) 特殊船舶磁性防护特点。一些特殊用途的船舶,其磁性防护要求比一般钢铁船舶磁性防护要求高一个数量级以上,除了将船体改用低磁或无磁材料建造外。一些钢铁船舶可以忽略不计的磁场也必须采取相应的防护措施,如设备铁磁性磁场、涡流磁场和杂散磁场等。

(2) 特殊船舶磁性防护关键技术。特殊船舶磁性防护关键技术包括设备磁性控制、涡流磁场控制、杂散磁场控制和全船设备剩余铁磁性磁场及涡流磁场补偿的消磁系统设计。其中设备磁性控制、消磁系统设计和涡流磁场控制贯穿舰船从设计、建造、检验和使用维护各个阶段,杂散磁场主要通过设计建造阶段进行控制。

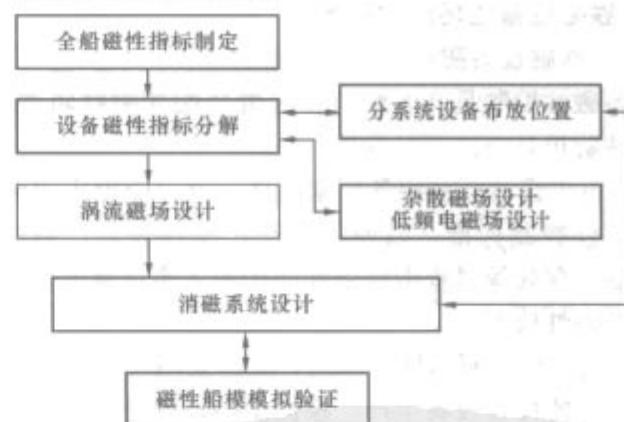


图 8.1-12 猎扫雷舰设计阶段磁性防护设计流程图

4.2.1 全寿命磁场防护

高磁性要求的船舶更加强调全寿命磁性防护,解决好设计、建造和使用维护各阶段的重点问题。

4.2.1.1 设计阶段磁性防护设计流程

猎扫雷舰设计阶段磁性防护设计流程图见图8.1-12。通过磁性船模实验对消磁系统设计完成后的磁性指标进行考核。

4.2.1.2 建造阶段磁性控制

无论是低磁钢船体还是铁磁设备,建造阶段一般按图8.1-13流程进行磁性防护控制。其中设备的运输、存储过程中的磁性控制要事先进行设计。设备整机的磁性控制是保证最终磁性指标的重要步骤,全船磁性检测应在动态检测站中进行,消磁系统调整是建造阶段磁性指标把关的最后

措施。

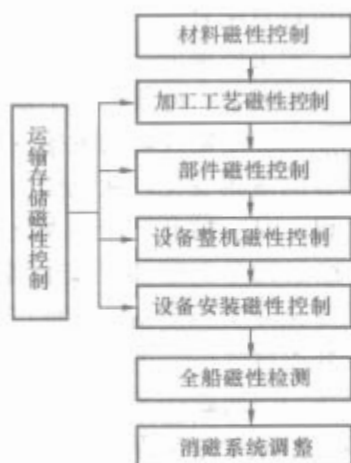


图 8.1-13 建造阶段的磁性控制流程

4.2.1.3 使用维护阶段磁性控制

使用维护阶段的磁性控制主要靠磁性防护制度的建立和监控手段的完善,如图 8.1-14 所示。当磁性发生变化后,通过重新调整消磁系统来保障磁性防护指标。

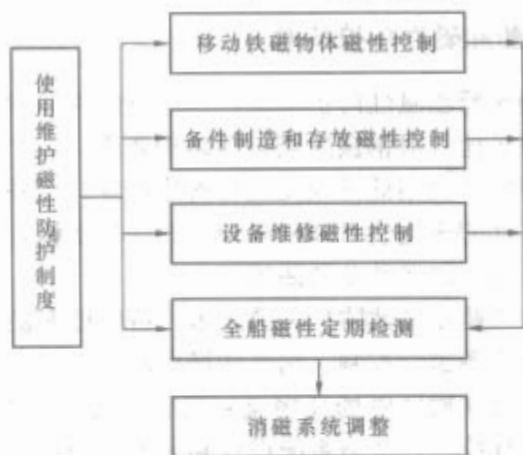


图 8.1-14 使用维护阶段磁性控制

4.2.2 铁磁设备磁场防护技术

4.2.2.1 铁磁设备磁性指标和动态控制

设备磁性控制是高磁性防护标准船舶的磁性防护重点,设备磁性防护具有以下特殊性:

(1) 由于设备分散到各厂家制造,所以应提出协调合理的设备磁性控制标准,以便各生产厂家在设计、制造、安装、运输、存放等过程中将磁性防护加入质量保证体系和进行最后的磁性检测。

(2) 由于与上面同样的原因,应该采用动态磁性保证措施,预测、监控各设备生产厂家提供的设备磁性数据,保证全船磁性指标动态地接近设计指标。

(3) 铁磁设备铁磁性的最大特点是固定磁场容易变化,一方面是由于设备各零部件磁特性不一致,导致相互影响,另一方面是由于设备工作状况引起的温度、压力变化会产生磁性状态的变化。所以要采用特殊的方法进行控制。

(4) 铁磁设备一旦安装到船上后,如果磁性指标发生变化,很难再进行处理,所以应加强上船前的磁性指标检测和磁稳定性检测,同时应具备从合成磁场中分析设备磁场的的能力。

4.2.2.2 铁磁设备感应磁性控制

(1) 在不影响设备的机械性能和电气性能以及其他特殊要求性能前提下,零部件尽量采用无磁材料建造。

(2) 在同等性能条件下,应选择体积小的设备。因为铁磁设备的磁性在一般条件下与设备的体积成正比。

(3) 用平均相对磁导率控制设备各零部件材料的磁性,

方法如下:

1) 如果分配给某设备的平均相对磁导率为 $\bar{\mu}_r$,该设备由 n 个零部件组成,则各零部件材料的相对磁导率 μ_{rn} 应满足下面的关系:

$$(\bar{\mu}_r - 1)V \geq \frac{\mu_{r1} - 1}{1 + (\mu_{r1} - 1)D_1}V_1 + \frac{\mu_{r2} - 1}{1 + (\mu_{r2} - 1)D_2}V_2 + \dots + \frac{\mu_{rn} - 1}{1 + (\mu_{rn} - 1)D_n}V_n \quad (8.1-37)$$

式中: V 为设备的总体积; V_n 为第 n 个零部件的体积; $\bar{\mu}_{rn}$ 为第 n 个零部件的材料磁化率; D_n 为第 n 个零部件的退磁因子。

2) 为便于计算,将式(8.1-37)变形为

$$V \geq \frac{\mu_{r1} - 1}{(\bar{\mu}_r - 1)[1 + (\mu_{r1} - 1)D_1]}V_1 + \frac{\mu_{r2} - 1}{(\bar{\mu}_r - 1)[1 + (\mu_{r2} - 1)D_2]}V_2 + \dots + \frac{\mu_{rn} - 1}{(\bar{\mu}_r - 1)[1 + (\mu_{rn} - 1)D_n]}V_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (8.1-38)$$

式中: X_n 定义为零部件的单位磁等效体积。 X_n 由下式确定

$$X_n = \frac{\mu_{rn} - 1}{(\bar{\mu}_r - 1)[1 + (\mu_{rn} - 1)D_n]}V \quad (8.1-39)$$

3) 式(8.1-39)的物理意义是,零部件磁性等效体积之和小于或等于零部件体积之和。

(4) 目前大量使用的是设备低磁化技术,在普通铁磁设备基础上采用零部件磁性处理和整机磁性永磁体补偿技术。对于这类设备,仍然可以利用平均相对磁导率的概念进行控制,即在给定的平均磁导率条件下,计算设备足够深度下的感应磁场,如果该感应磁场的量级较大,特别是感应磁场形状系数不能用船上消磁系统进行补偿,则应该加局部补偿消磁系统。

4.2.2.3 铁磁设备固定磁性控制

(1) 设备的固定磁场总量应控制在全船最大感应磁场的1/3倍。

(2) 设备的固定磁场控制主要依靠零部件消磁。

1) 因为有些零部件的磁矫顽力很大,必须提供足够强的磁场才能用电流消磁法进行处理,其处理的磁场初始幅值一般应满足

$$H_{1m} \geq 1.4[1 + (\mu_{mr} - 1)D]H_c \quad (8.1-40)$$

式中: H_{1m} 为处理磁场的初始幅值; H_c 为物体的内禀矫顽力; D 为物体的退磁因子; μ_{mr} 为物体材料的最大相对磁导率。

2) 零部件应处在无磁环境中单独进行磁性处理。否则部件相互间的影响难以真正将零部件的固定磁性消除。如果物体处在另一铁磁物体包围中,则磁屏蔽效果增加了设备磁性处理的难度。

(3) 零部件的固定磁性,特别是运动零部件的固定磁性对设备磁性是非常有害的,这是因为零部件运动时将会对周围其他零部件产生不断变化的磁化,使得设备磁性发生变化。

(4) 设备固定磁性由于会受温度、压力等其他非磁性因素的改变发生变化,将普通铁磁设备用低磁化技术处理后,最关键的问题是保证固定磁性的稳定。

4.2.3 涡流磁场防护技术

涡流磁场为交变磁场,与物体相对外磁场的运动速度有

关。涡流磁场防护是高磁性要求船舶磁性防护中的重要内容。

4.2.3.1 涡流磁场的来源

当舰船运动或设备运动时,作用在船体上或设备上的地磁场磁通量发生变化。一般可分为下述几种类型:

(1) 高速旋转运动设备产生的涡流磁场。当推进系统主轴、柴油机飞轮高速旋转时,它们会切割地磁场磁力线,从而产生涡流磁场,如图 8.1-15 所示。

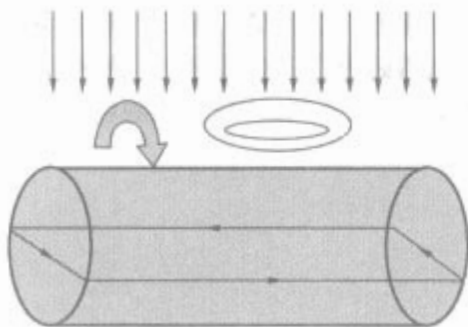


图 8.1-15 旋转设备在地磁场作用下产生涡流

(2) 船上导体设备、框架回路产生的涡流磁场。船上由导电材料制造的设备和框架虽然相对船体是静止的,但随着舰船的运动(转向、纵摇和横摇等),也会切割地磁场磁力线而产生涡流磁场。

(3) 低磁钢船体产生的涡流磁场。当猎扫雷舰船体用低磁钢建造时,虽然船体的铁磁性得到控制,但是由于低磁钢的导电特性,船体在运动过程中切割地磁场磁力线产生涡流磁场。

4.2.3.2 涡流磁场的变化规律和控制方法

(1) 涡流磁场为低频交变磁场,变化频率与物体的变化速度有关。只有形状规则的物体可以求出解析解,一般物体要用数值解。

(2) 涡流磁场的大小与下列因素有关:

- 1) 舰船运动的速度,特别是纵摇和横摇的速率。
- 2) 地球磁场的大小。
- 3) 旋转物体的转速。
- 4) 旋转物体、平板的尺寸及框架和管路回路所围面积的大小。
- 5) 旋转物体、平板、框架和管路材料的电导率。

(3) 涡流磁场控制的总体原则是采用低电导率的材料并尽量减少物体导电截面积。例如,如果将相同的面积分离成相互绝缘的两半,则涡流磁场将会减少一半。对于管路结构,应尽量在回路中加上电绝缘,使之不构成电回路,而且注意电气接地的导体不能形成连续回路。

4.2.3.3 旋转设备涡流磁场的控制

(1) 先按照舰船总体磁性要求分配给某台设备涡流磁场防护指标,然后根据设备的转速情况按进行设备材料磁导率、电导率和尺寸的选择设计。

(2) 对旋转轴,按式(8.1-41)进行控制

$$\mu_r \sigma \omega S^2 L \leq Z_{\text{emax}} \times 1.18 \times 10^{11} \quad (8.1-41)$$

式中: Z_{emax} 为规定该设备在 10m 深度下的最大涡流磁场, nT; μ_r 为圆柱体的相对磁导率,无量纲; σ 为圆柱体的电导率, Ω/m ; ω 为圆柱体转动的圆频率, rad/s ; S 为圆柱体的截面积, m^2 ; L 为圆柱体的长度, m 。

(3) 对旋转圆盘,按式(8.1-42)进行控制

$$\mu_r \sigma \omega S b^3 \leq Z_{\text{emax}} \times 1.50 \times 10^{11} \quad (8.1-42)$$

式中: Z_{emax} 为规定该设备在 10m 深度下的最大涡流磁场, nT; S 为圆盘的面积, m^2 ; b 为圆盘的厚度, m 。

4.2.3.4 导体板块涡流磁场的控制

导体板产生的涡流磁场与舰船摇摆状态和板的布置方式有关:

(1) 体板水平放置时,按式(8.1-43)进行控制

$$\mu_r \sigma \omega \theta_0 S^2 L \leq 1.26 Z_{\text{emax}} \times 10^{11} \quad (8.1-43)$$

(2) 体板垂直放置时,按式(8.1-44)进行控制

$$\mu_r \sigma \omega \theta_0 S^2 L \leq 2.26 Z_{\text{emax}} \times 10^{11} \quad (8.1-44)$$

式中: Z_{emax} 为规定该设备在 10m 深度下的最大涡流磁场, nT; θ_0 为舰船摇摆的最大幅度, rad 。

4.2.3.5 全船涡流磁场的控制

由低磁钢材料建造船体的高磁性防护船舶,应该在全船消磁系统绕组中设计涡流磁场补偿绕组,在消磁控制设备和消磁电源中设计涡流补偿通道。

4.2.4 杂散磁场防护技术

4.2.4.1 杂散磁场的来源

(1) 扫雷发电机产生的杂散磁场:扫雷作业时扫雷发电机将发出 4000 多安培特殊波形的电流。由发电机的励磁绕组产生的磁场、定子的主极绕组和补偿极绕组产生的磁场、电枢等磁场的泄漏会形成舰船的杂散磁场。

(2) 直流回路电缆的杂散磁场:具有正负电流方向的直流单芯电缆和多心电缆,在有间距而又平行的场合,会产生杂散磁场,其磁场值与电流大小和电缆的间距大小有关。

(3) 电磁接触器的杂散磁场:在电磁接触器的结构上会形成大电流回路的场合也会产生杂散磁场。

4.2.4.2 杂散磁场的变化特征

(1) 电机泄漏的杂散磁场计算比较复杂,一种借助专用软件,先用有限元方法计算电机内部磁化强度,然后用等效磁源方法计算外部磁场。图 8.1-16 为某永磁同步电机转子产生的杂散磁场,图中磁场为转轴某一截面,距离转轴 1.5 倍直径的圆周上。

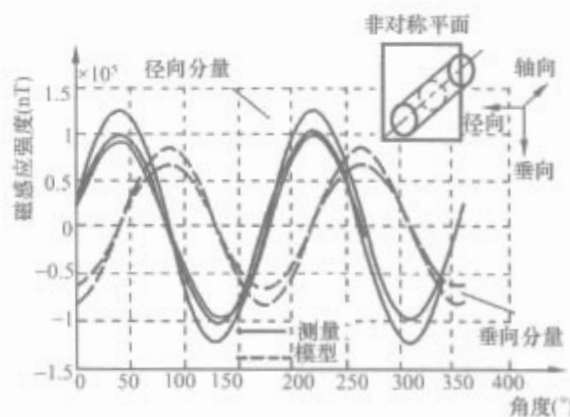


图 8.1-16 永磁同步电机转子产生的杂散磁场

(2) 直流电流在空间产生的杂散磁场可以用毕奥-沙伐尔定律计算。直流电源来回线在空间不可能完全重合,在空间产生的磁场不能相互抵消,从而产生杂散磁场如图 8.1-17 所示。即使电缆完全紧贴在一起,由于大电流需要通过一定尺寸截面的电缆,也会产生足够大的感应磁场。图 8.1-18

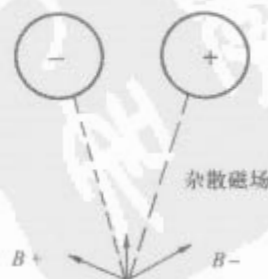


图 8.1-17 电源回线杂散磁场示意图

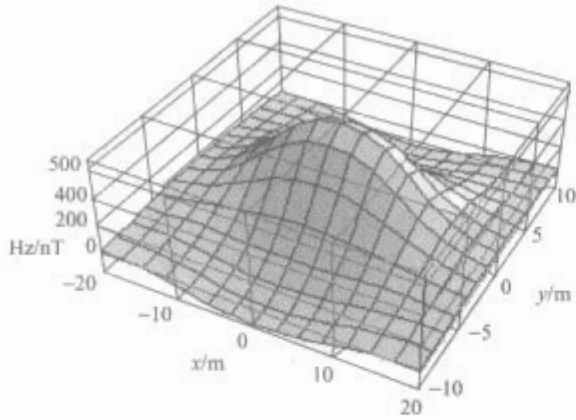


图 8.1-18 六根平行导线杂散磁场分布图

中给出了六根导线平行靠紧时，电缆下方 7.5m 平面上的杂散磁场的垂直分量空间分布情况。其中假设相邻三根导线通正向电流，而另三根相邻导线通负向电流，电缆长 18m，外径为 40mm，直流总电流为 2 000A（每根电缆 667A）。

4.2.4.3 杂散磁场的控制方法

杂散磁场的控制主要靠严密的电磁设计和可靠的施工质量保证。

(1) 电机杂散磁场的控制主要是要改善发电机的设计，并制定相应设计制造工艺要求，减少电机的漏磁场。

(2) 电缆杂散磁场在设计和施工中的控制要符合已经制定的相关标准，如 HJB 161—1997《舰船电缆低杂散磁场敷设要求》等。

第2章 船舶磁场测量与计算

船舶磁场的测量是船舶消磁绕组设计、磁性处理以及磁性防护性能研究的基础。目前各国在实船测量中主要是测量磁场的垂直分量,但在科学研究中、消磁实验室内以及某些固定消磁站中也经常需要测量磁场的三个分量。

(1) 标准测量深度:衡量消磁结果的好坏,不仅要考虑所测得的磁场大小,而且还要注明测量深度。因此在消磁勤务中规定了一个标准测量深度,用符号 h_b 表示,定义为从船舶满载吃水线算起,若干倍数最大船宽 B_c 的测量深度。

(2) 深度换算:船舶消磁或消磁绕组调整后,在标准测量深度上的磁场值应不大于消磁标准的规定值。如果受场地限制,不能在标准测量深度上测量磁场时,则须进行深度换算,把所测磁场换算为标准测量深度上的磁场。

1 船舶磁场测量方式

船舶磁场测量方式主要有:悬挂探头法、敞开式检测站、移动式测量架、磁探头矩阵、水下行车、自动测量系统等。

1.1 悬挂探头测量法

被测船舶在消磁场地按规定方向系水鼓,磁探头按规定悬挂在船舶下方,用手提式磁强计测量各点磁场。测量点的分布及磁探头悬挂方式分别如图 8.2-1 及图 8.2-2 所示。图中数字表示船长的倍数。

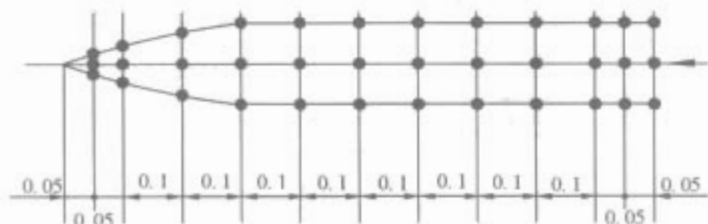


图 8.2-1 测量点分布图



图 8.2-2 磁探头悬挂方式图

(1) 场地要求:

- 1) 有足够的水深,至少应大于各类船舶中的最大标准测量深度。
- 2) 潮差小,流速应小于 0.5 节,背风避浪。
- 3) 不要选在地磁异常区内。
- 4) 场地内无沉船等铁质物质,无电力电缆通过,地磁场不失真。
- 5) 避开船舶集中地,防止其他船舶的磁场影响。但为便于各类船舶消磁,也不能离开基地太远。

6) 避开主航道,不影响其他船舶航行。

7) 场地内,在互成 90° 的主航向上设有水鼓,以便将船舶固定在四个主航向的任一航向上。

(2) 悬挂探头测量法的优点:设备简单,主要设备是手提式磁强计,投资少、机动性好、便于操作和维修。

(3) 悬挂探头测量法的缺点:测量受海情、气象影响大,只能在平潮时测量;流速大时,磁探头发生倾斜和位移,偏离预定点,并且摇摆不定,仪器无法读数;吊绳受探头重力作用后伸长,偏离预定深度,使测量误差增大;占用较多人力,劳动强度大。

1.2 敞开式检测站

(1) 敞开式检测站布置见图 8.2-3。在近岸海底敷设一排磁探头或磁通计探测线圈,岸边仪器室内装备测磁仪器、记录器及各种控制设备。各探头通过水下电缆与仪器连接。被测船舶以某一航向通过探头上时,记录器记下船舶磁场分布曲线及船艏标记。磁探头布置的深度、间距及数量由被测船舶的类型及要求测得的数据决定。分别设置浅水场地和深水场地来满足各类船舶的测量深度要求。一般浅水场地水深 6~8m,探头间距 2~3m,用以测量小船;深水场地 10~13m,探头间距 3~5m,用以测量中大型船只。

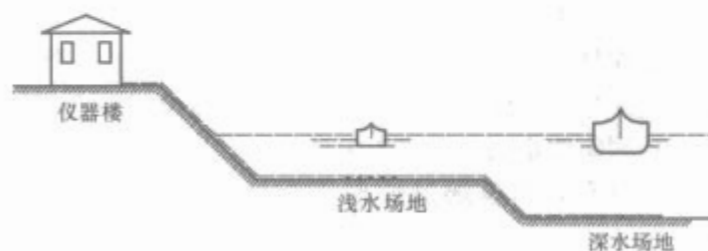


图 8.2-3 敞开式检测站布置

(2) 场地要求:

- 1) 水深适当。
- 2) 距岸上建筑不太远,最好在 1000m 以内。
- 3) 海域开阔,保证船舶以中速航行时有足够的提前量及回旋余地。
- 4) 地形允许时,最好能敷设互相垂直的两排探头阵列。
- 5) 岸上设叠标导航,引导船舶正确通过。
- 6) 场地内地磁场均匀,无沉船及其他铁磁物质,无电力电缆通过,附近无其他磁场干扰源。
- 7) 潮差小,流速小,背风避浪。
- 8) 靠近基地,交通方便,易于补给及人员调整。

(3) 优点:测量迅速;可以测量动态磁场和磁场的三个分量,特别适用于船舶进行例行检查;探头固定,不受潮流影响,准确度高;可配备自动数据处理系统,提高自动化水平。

(4) 缺点:理想的场地不容易找到;建站投资较大,探头水下安装难度大,不容易保证安装精度和长期稳定性,发生故障时维修困难;探头的深度、间距都是固定的,无法兼顾各种船舶;通过探头阵列时,船舶易受风浪和海流影响偏离预定航向,难以直接精确得到船舶龙骨下和舷下磁场,给

数据分析增加困难;装配高精度的航迹测量系统,技术装备复杂,对操作人员水平要求较高。

1.3 大平面磁探头阵列测量法

(1) 磁探头阵列测量船舶磁场见图 8.2-4。在无磁码头海底布设探头阵列,探头经电缆与岸边仪器室相连,被测船舶停泊在磁探头阵列上方。控制器依次切换以测量各点磁场,数据经计算机处理后自动打印输出。

(2) 优点。测量准确、迅速;可以测量三分量磁场;自动化程度高,有利于提高消磁水平。

(3) 缺点。造价昂贵,投资大,水下施工工作量大,施工精度要求高;探头布置的深度、密度、范围等都是固定的,难以兼顾各类船舶;船舶易受风及海流影响,艏位可能有偏移,影响定位精度;水下部分发生故障,更换或维修困难;整个系统装置复杂,须要相当熟练的人员方能操作。

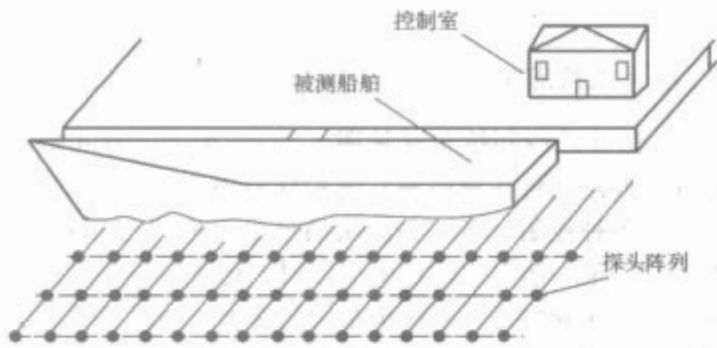


图 8.2-4 用磁探头阵列测量船舶磁场

1.4 水下行车测量

(1) 水下磁场测量行车见图 8.2-5。行车呈 U 形,由电动机驱动在轨道上往返运行,探头固定在行车的升降横梁上,经电缆与岸上仪器室相连,架设于无磁双码头中间。测量时,被测船舶系泊在双码头中央,横梁下降到预定测量深度,开动行车,匀速通过船舶下方,测量设备记录磁场数据。

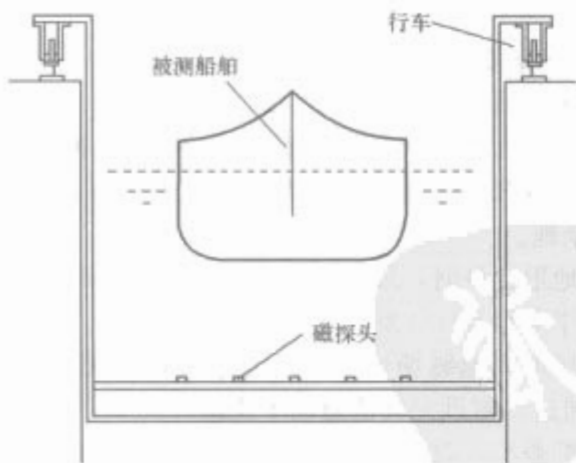


图 8.2-5 水下磁场测量行车

(2) 优点。快速、准确、不受潮水和流速影响,可以测量三分量磁场;测量深度及探头间距可以调节,可以测连续曲线;配计算机后可进行数据分析,自动化程度高;只要采取严格措施并进行妥善安装,行车运行过程中由于震动、倾斜等产生的误差可以相当小。

(3) 缺点。造价高,要建造非磁性码头,行车也必须用无磁或低磁材料建造;码头的长期稳定性要好,行车及轨道安装精度要求高。

1.5 移动式磁场检测站

(1) 移动式磁场检测站有多种形式,典型的有两种。

1) 测量架式:把若干个磁探头安装在测量桁架上,桁架由非磁性材料建造,长 20m 左右,由消磁船携带到固定地点,用起吊装置把它吊放至海底。消磁船在桁架附近适当距离处锚泊,各探头的通信电缆与消磁船上仪器连接。被测船舶通过测量桁架上方,实施测量和记录。

2) 三分量双探头或四探头式:双探头或四探头测磁系统由被测船舶或消磁船携带到固定地点,用起吊装置把它吊放至海底。当被测船舶通过测量探头上时,实施测量,测量数据无线传送到被测船舶或消磁船。目前用于实际消磁任务的移动式磁场检测站我国尚未开发。

(2) 优点:有一定的机动性。

(3) 缺点:测量深度决定于海区水深,测量结果易受海底不平、风浪、船舶偏航等因素影响,只能进行较粗略的磁场测量。

1.6 磁场测量自动化系统

(1) 以上介绍的几种船舶磁场测量方式均可借助计算机实现测量自动化,图 8.2-6 是一个典型的以计算机为中心的船舶磁场自动测量及数据处理系统。该系统具有原始数据测量、分析、绘图、制表、显示、消磁绕组最佳安匝数配置以及消磁绕组设计等多种功能。磁场信号经探头、电子线路变成电信号;采样器依次采集各点电压,经模数转换器变成数字量后输入计算机;航迹系统用来确定船舶经过探头阵列的航迹,以确定船舶与探头的相对位置;深度计测量实时水深;地磁参考探头监视地磁场的变化。以上信息和被测船舶的消磁绕组分布,绕组效率等数据全部输入计算机。计算机根据预编程进行分析、运算、存储和输出结果。



图 8.2-6 船舶磁场自动测量及数据处理系统框图

(2) 功能。

- 1) 测量船舶的原始磁场和结果磁场。
- 2) 进行磁场分析,求解各种磁场分量。
- 3) 进行深度换算,计算任一平面上的磁场。
- 4) 船舶偏航时,校正磁场数据。
- 5) 寻求消磁绕组最优安匝调整,计算最大安匝数,模拟分析船舶消磁绕组位置变化的影响。
- 6) 计算任意航向时的磁场。
- 7) 绘制和显示船舶磁场等强线图、磁源位置及航迹。
- 8) 打印输出或存储运行结果。

2 船舶磁场测量仪器

从原则上讲,凡是能用来确定磁场及其变化的方法和

原理都可以用来测量船舶磁场,如:绕轴旋转的磁针,绕轴转动的线圈,绕以一定线圈的软磁性合金的饱和特性,核子共振、光泵测磁、超导测磁等。实际消磁勤务中对船舶磁场的测量主要是使用磁通门磁强计。

不同型号的磁通门磁强计其构成是有差异的,但其基本构成大同小异。这里介绍一种消磁勤务中普遍使用的 CCY 型数字测磁仪,该仪器的基本构成共分成七个模块,见图 8.2-7。

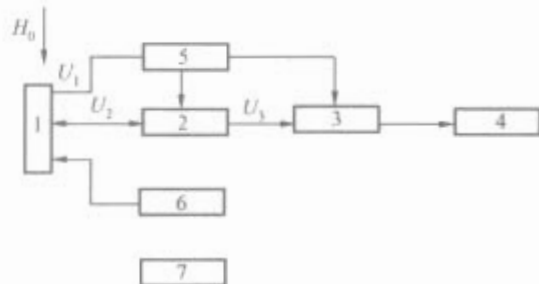


图 8.2-7 单探头电路方块图

1—铁心探头; 2—模拟信号处理电路; 3—模数转换电路; 4—液晶显示电路; 5—励磁电路; 6—地磁补偿及调零电路; 7—直流电源

(1) 铁心探头。

- 1) 主要功能: 感应反映磁场。
- 2) 探头结构: 见图 8.2-8。

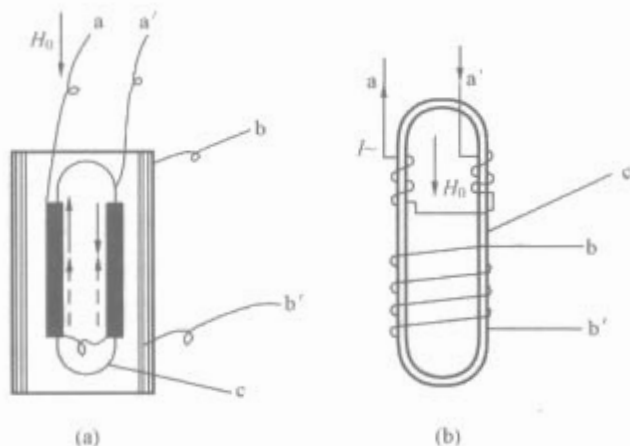


图 8.2-8 探头结构示意图

(a) 结构示意图; (b) 电路磁路关系图

c 为跑道形铁心,用饱和磁感应强度低、矫顽力小、交流导磁率和初导磁率高的 FC-12 非晶态软磁合金带环绕而成。励磁绕组 aa' 由两个铁心支路线圈顺向串联组成,绕组绕在空心框架上,铁心从框架中穿过,绕成封闭式跑道形,信号绕组 bb' 绕在筒形框架上,铁心放在筒形框架中和待测磁场 H_0 相对应的信号电压从 bb' 端输出。

(2) 模拟信号处理电路。

1) 主要功能。将检测到的信号去直流、滤波(带通滤波,中心频率: 8kHz)和交流放大后经相敏检波电路转化成直流,再经滤波(低通滤波)和积分放大为模数转换电路提供大小反应外磁场 H_0 幅值、极性反应 H_0 相位的输入电压 U_0 。

2) 模拟信号处理电路方块见图 8.2-9。

(3) 模数转换电路。

1) 主要功能: 将模拟电路输出的电压 U_0 转换成频率信号 f_{out} ; 将反映 U_0 正负的信号单独检出用来控制液晶显示板的符号位。

2) 模数转换电路见图 8.2-10。

(4) 液晶显示电路。

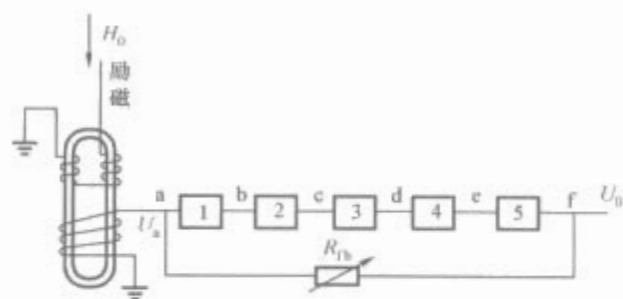


图 8.2-9 模拟信号处理电路方块图

1—缓冲器; 2—带通滤波器交流放大器; 3—相敏检波; 4—低通滤波; 5—积分放大器; R_{fb} —反馈电阻

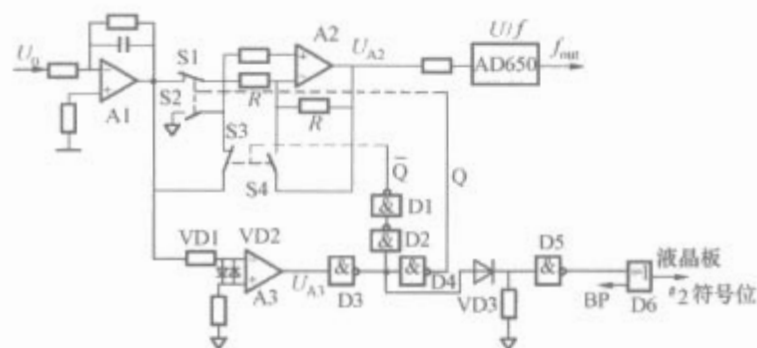


图 8.2-10 模数转换电路

- 1) 主要功能: 以数字显示被测磁场数据。
- 2) 液晶显示电路见图 8.2-11。

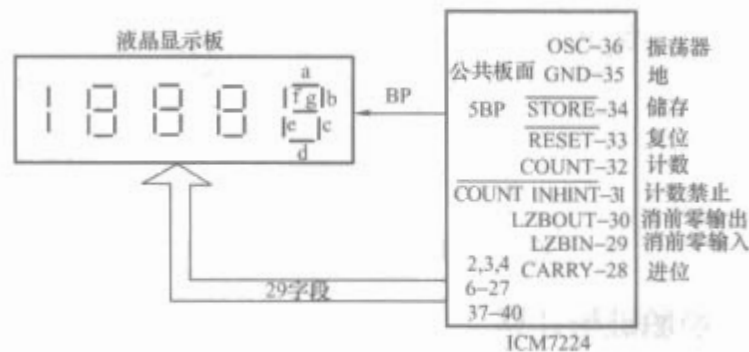


图 8.2-11 液晶显示电路

(5) 励磁电路。

1) 主要功能。向探头提供励磁用的 4kHz 方波电压; 向模拟信号处理电路提供相敏检波用的 8kHz 方波电压; 向模数转换电路提供控制计数的门控信号。

2) 励磁电路方块图见图 8.2-12。

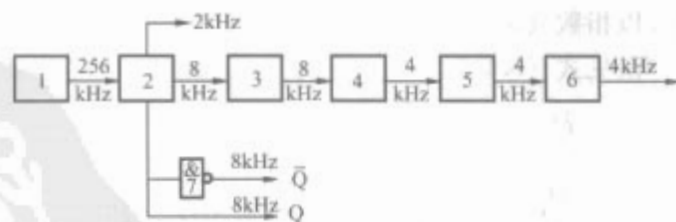


图 8.2-12 励磁电路

1—晶体振荡器; 2—分频器; 3—单稳触发器; 4—D 触发器; 5—限幅器; 6—功率放大器; 7—与非门

(6) 地磁补偿及调零电路。

1) 主要功能。补偿通过探头的地磁场(有时还有杂散磁场)来实现仪器对被测磁场的直接显示; 校正电路零点。

2) 地磁补偿及调零电路见图 8.2-13。

(7) 直流电源。

1) 主要功能。提供 $\pm 9V$ 的直流电源。

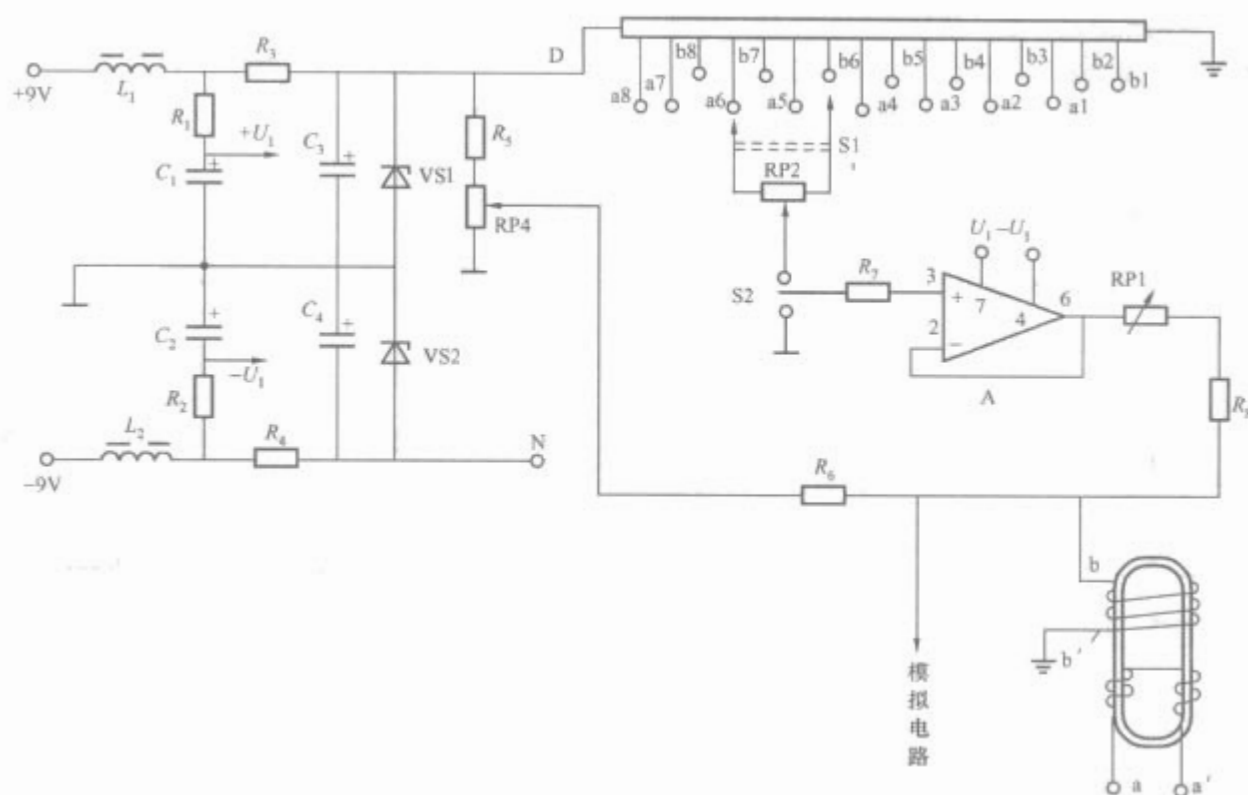


图 8.2-13 地磁补偿及调零电路

2) 正电源原理电路图见图 8.2-14, 负电源与此类似。

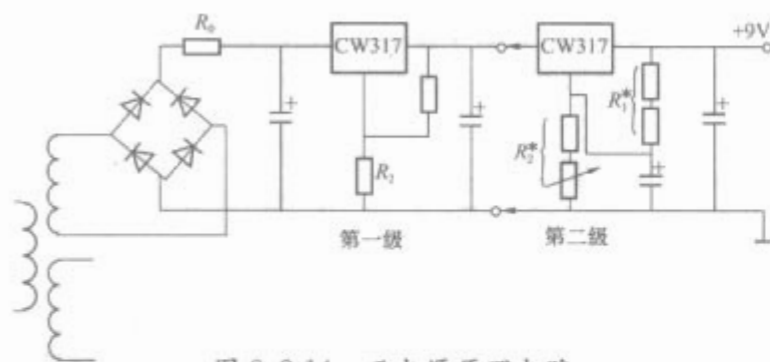


图 8.2-14 正电源原理电路

3 船舶磁场计算

船舶磁场换算是利用船舶实际测量深度上分布的磁场推算船舶在其他深度上的磁场分布的计算方法。目前较常用的船舶磁场换算方法有: 指数衰减法、大平面换算法、谐波分析法、模拟换算法、边界元法。

3.1 指数衰减法

指数衰减法是一种经验公式法, 这种方法认为船舶磁场随深度以指数衰减, 但不同深度范围内衰减指数值不同, 其换算方法见式 (8.2-1)

$$\begin{cases} \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\frac{1}{2}} & h_1, h_2 \in [0.7B, 1.5B] \\ \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 & h_1, h_2 \in [1.5B, 2.0B] \\ \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\frac{5}{2}} & h_1, h_2 \in [2.0B, 5.0B] \\ \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 & h_1, h_2 \in [5.0B, +\infty) \end{cases} \quad (8.2-1)$$

式中: h_1 、 h_2 为深度, m; H_1 、 H_2 为深度 h_1 、 h_2 对应的磁场, mOe。

3.2 大平面换算法

大平面换算法是由解半空间拉普拉斯边值问题积分公式导出的一种方法。

利用下方某一深度上大平面的已测磁场 Z 分量值, 向

更深处点 (x_0, y_0, z_0) 的磁场换算公式见式 (8.2-2)

$$\begin{cases} H_x(x_0, y_0, z_0) = -\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{H_z(x_i, y_j, z) (x_i - x_0)}{r_{ij}^3} \Delta x \Delta y \\ H_y(x_0, y_0, z_0) = -\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{H_z(x_i, y_j, z) (y_j - y_0)}{r_{ij}^3} \Delta x \Delta y \\ H_z(x_0, y_0, z_0) = \frac{z_0}{2\pi} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{H_z(x_i, y_j, z)}{r_{ij}^3} \Delta x \Delta y \end{cases} \quad (8.2-2)$$

式中: m 为纵向测量点数; n 为横向测量点数; Δx 为纵向测量点间距, m; Δy 为横向测量点间距, m; (x_i, y_j, z) 为各测量点坐标, m; (x_0, y_0, z_0) 为换算点坐标, m; r_{ij} 为点 (x_0, y_0, z_0) 与点 (x_i, y_j, z) 之间距离, m; $H_z(x_i, y_j, z)$ 为各测量点磁场 Z 分量, T; $H_x(x_0, y_0, z_0)$ 、 $H_y(x_0, y_0, z_0)$ 、 $H_z(x_0, y_0, z_0)$ 为换算点磁场三个分量, T。

应用大平面换算时, 测量平面越大, 测量点越密集, 换算精度越高。

3.3 谐波分析法

谐波分析法是求解拉普拉斯边值问题的解析方法, 换算公式由双重傅里叶级数表示。利用下方某一深度上大平面的已测磁场 Z 分量值, 向更深处点 (x_0, y_0, z_0) 的磁场换算公式见式 (8.2-3)

$$\begin{cases} H_x(x, y, z) = -\sum_{m=1}^{K_M} \sum_{n=1}^{K_N} \frac{m\pi}{2al} C_{mn} e^{-l(z-z_0)} \cos \frac{m\pi(x+a)}{2a} \sin \frac{n\pi(y+b)}{2b} \\ H_y(x, y, z) = -\sum_{m=1}^{K_M} \sum_{n=1}^{K_N} \frac{n\pi}{2bl} C_{mn} e^{-l(z-z_0)} \sin \frac{m\pi(x+a)}{2a} \cos \frac{n\pi(y+b)}{2b} \\ H_z(x, y, z) = \sum_{m=1}^{K_M} \sum_{n=1}^{K_N} C_{mn} e^{-l(z-z_0)} \sin \frac{m\pi(x+a)}{2a} \sin \frac{n\pi(y+b)}{2b} \end{cases} \quad (8.2-3)$$

式中: a 为大平面长度的一半, m; b 为大平面宽度的一半, m; m 、 n 为谐波次数; K_M 、 K_N 为所取最大谐波次数; (x, y, z) 为计算点坐标, m; $H_x(x, y, z)$ 、 $H_y(x, y, z)$ 、 $H_z(x, y, z)$ 为计算点磁场三分量, T。 l 的计算见

式(8.2-4), C_{mn} 的计算见式(8.2-5)

$$l = \pi \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2} \quad (8.2-4)$$

$$C_{mn} = \frac{4}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N H_z(x_i, y_j, z_0) \sin \frac{m\pi(x_i + a)}{2a} \sin \frac{n\pi(y_j + b)}{2b} \quad (8.2-5)$$

式中: M 为大平面纵向等分数; N 为大平面横向等分数; (x_i, y_j, z_0) 为各测量点坐标, m, n ; $H_z(x_i, y_j, z_0)$ 为各测量点磁场 Z 分量, T。

应用谐波分析法进行换算时, 测量平面越大, 测量点越密集, 换算精度越高。

3.4 模拟换算法

船舶磁场的模拟换算法是用若干个磁偶极子或均匀磁化的旋转椭球体模拟船舶磁场, 进而用这些磁偶极子或均匀磁化的旋转椭球体产生的磁场来计算船舶外任意点磁场的一种换算方法。磁偶极子位置或均匀磁化的旋转椭球体位置和形状参数一般由定性分析或经验确定。

3.5 磁偶极子阵列模拟换算法

3.5.1 磁偶极子产生的磁场

磁偶极子产生的磁场可用式(8.2-6)表示

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (8.2-6)$$

式中: M_x, M_y, M_z 为磁偶极子磁矩三分量, $W \cdot m$ 。

系数矩阵各元素可用式(8.2-7)~式(8.2-16)计算

$$b_{11} = \frac{1}{4\pi r^5} [3(x-x_c)^2 - r^2] \quad (8.2-7)$$

$$b_{12} = \frac{3}{4\pi r^5} (x-x_c)(y-y_c) \quad (8.2-8)$$

$$b_{13} = \frac{3}{4\pi r^5} (x-x_c)(z-z_c) \quad (8.2-9)$$

$$b_{21} = b_{12} \quad (8.2-10)$$

$$b_{22} = \frac{1}{4\pi r^5} [3(y-y_c)^2 - r^2] \quad (8.2-11)$$

$$b_{23} = \frac{3}{4\pi r^5} (y-y_c)(z-z_c) \quad (8.2-12)$$

$$b_{31} = b_{13} \quad (8.2-13)$$

$$b_{32} = b_{23} \quad (8.2-14)$$

$$b_{33} = \frac{1}{4\pi r^5} [3(z-z_c)^2 - r^2] \quad (8.2-15)$$

$$r = \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2} \quad (8.2-16)$$

式(8.2-7)~式(8.2-16)中: (x, y, z) 为计算点坐标, $m; (x_c, y_c, z_c)$ 为磁偶极子坐标, m 。

3.5.2 换算方法

测量船舶周围 m 个点上的磁场, 采用 n 个磁偶极子模拟船舶磁场, 可列出线性方程组(8.2-17)

$$H_i = \sum_{j=1}^n H_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (8.2-17)$$

式中: H_i 为第 i 点上磁场测量值; H_{ij} 为第 j 个磁偶极子在第 i 点上产生的磁场, 可按式(8.2-6)计算。

换算只利用单分量磁场数据时 $m > 3n$, 利用三分量磁场数据时, $m > n$, 方程(8.2-17)是以磁偶极子磁矩为未知数的线性矛盾方程组, 可求得最小二乘意义下的解。求得各磁偶极子的磁矩后, 可用式(8.2-18)计算船舶空间点上的

磁场。计算式为

$$H = \sum_{j=1}^n H_j \quad (8.2-18)$$

式中: H_j 为第 j 个磁偶极子在计算点上产生的磁场, 可按式(8.2-6)计算。

3.5.3 均匀磁化旋转椭球体阵列模拟换算法

3.5.3.1 均匀磁化旋转椭球体产生的磁场

均匀磁化旋转椭球体长轴沿 X 方向, 其产生的磁场亦可如式(8.2-6)表示。系数矩阵各元素则可用式(8.2-19)~式(8.2-29)计算。

$$b_{11} = -\frac{3}{8\pi g^3} \ln \frac{a+g}{a-g} + \frac{3a}{4\pi g^2 t} \quad (8.2-19)$$

$$b_{12} = \frac{3}{4\pi} \frac{(x-x_c)(y-y_c)}{ab^2 t} \quad (8.2-20)$$

$$b_{21} = b_{12} \quad (8.2-21)$$

$$b_{22} = \frac{3}{4\pi} \frac{a(y-y_c)^2}{b^4 t} + \frac{3}{8\pi} \left(\frac{1}{2g^3} \ln \frac{a+g}{a-g} - \frac{a}{b^2 g^2} \right) \quad (8.2-22)$$

$$b_{23} = \frac{3}{4\pi} \frac{a(y-y_c)(z-z_c)}{b^4 t} \quad (8.2-23)$$

$$b_{31} = b_{13} \quad (8.2-24)$$

$$b_{32} = b_{23} \quad (8.2-25)$$

$$b_{33} = \frac{3}{4\pi} \frac{a(z-z_c)^2}{b^4 t} + \frac{3}{8\pi} \left(\frac{1}{2g^3} \ln \frac{a+g}{a-g} - \frac{a}{b^2 g^2} \right) \quad (8.2-26)$$

$$t = \sqrt{[(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 + g^2]^2 - 4g^2(x-x_c)^2} \quad (8.2-27)$$

$$a = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 + g^2 + t} \quad (8.2-28)$$

$$b = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 - g^2 + t} \quad (8.2-29)$$

式(8.2-19)~式(8.2-29)中: (x, y, z) 为计算点坐标, $m; (x_c, y_c, z_c)$ 为旋转椭球体中心坐标, $m; g$ 为旋转椭球体半焦距。

3.5.3.2 换算方法

旋转椭球体阵列模拟换算法与磁偶极子阵列模拟换算法类似, 见本章3.4.2, 把其中的方程组未知数换为各椭球体的磁矩, 磁偶极子磁场计算公式换成旋转椭球体计算公式即可。

3.6 边界元法

船舶磁场的边界元换算法是通过求解闭合边界面外的磁场标量位调和函数的积分方程导出。

3.6.1 方法原理

边界元换算法的原理见式(8.2-30)~式(8.2-32)

$$\int_S u \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS + 2\pi u(M_0) = \int_S \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial n} ds \quad (8.2-30)$$

式中: S 为包围船舶的闭合边界面; n 为闭合边界面的法线方向; $u(M_0)$ 为边界面上定点 M_0 磁场标量位; u 为边界面上动点 (除点 M_0 外) 的磁场标量; r 为边界面上动点到定点 M_0 的距离。

$$u(P) = -\frac{1}{4\pi} \int_S \left[u \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) - \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial u}{\partial n} \right] ds \quad (8.2-31)$$

式中: $u(P)$ 为边界面外部计算点 P 的磁场标量位; u 为

边界面上的磁场标量位； r 为 P 至边界面上点的距离。

计算点 $P(x_p, y_p, z_p)$ 的磁场为

$$\begin{cases} H_x(P) = -\frac{\partial u(P)}{\partial x_p} \\ H_y(P) = -\frac{\partial u(P)}{\partial y_p} \\ H_z(P) = -\frac{\partial u(P)}{\partial z_p} \end{cases} \quad (8.2-32)$$

3.6.2 换算

把闭合边界面划分为 m 个面元，离散化 (8.2-30) 得方程组 (8.2-33)

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} u_j + 2\pi u_i = \sum_{j=1}^m b_{ij} \frac{\partial u}{\partial n} \Big|_j \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8.2-33)$$

其中, a_{ij} 、 b_{ij} 可由式(8.2-34) ~ 式(8.2-36) 计算

$$a_{ij} = \int_{S_j} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r_{ij}} \right) dS_j \quad (8.2-34)$$

$$b_{ij} = \int_{S_j} \frac{1}{r_{ij}} dS_j \quad (8.2-35)$$

$$r_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (8.2-36)$$

取包围船舶的长方体表面为闭合边界面，长方体纵向、横向、垂向分别对应船舶的纵向、横向、垂向。此时法向导数转化为对 x, y, z 的导数，不难求得系数 a_{ij} 、 b_{ij} ，而 u 的法向导数值转化为相应的磁场分量值（可用面元中心测量的磁场分量值），从而可求解方程组 (8.2-33) 得到边界面上的 u 函数值。

求得边界面上的 u 函数值后即可按式 (8.2-32) 计算边界面外部任意点上的磁场。



第3章 船舶固定磁场消磁

1 船舶固定磁场消磁方法

船舶固定磁场消磁有时也称为临时线圈消磁或无绕组消磁。用这种消磁方法消磁是由消磁船或消磁站来进行的。根据所采用消磁线圈的形式及处理工艺过程的差别,临时线圈消磁法可分为一般消磁法、局部消磁法和综合消磁法等。

所谓临时线圈消磁法是对被消磁船舶而言的。即当实施临时线圈消磁时,首先在被消磁船舶上临时绕上消磁线圈,或把被消磁船舶停泊到海上或船坞中已敷设好的消磁线圈上方(或消磁线圈中间),待通电处理好后,再把临时绕上的线圈拆除或让被消磁船舶离开海上消磁线圈或船坞消磁线圈。

临时线圈消磁一般消去船舶的固定磁性。有时也使船舶反向磁化,产生一个与 Z_x 相反的固定磁场 Z_{px} , 以克服垂向感应磁场 Z_{ix} 的影响。此外,对于装有固定消磁绕组的船舶,临时线圈消磁法还可根据固定绕组的需要对船舶磁场进行整理。

1.1 一般消磁法

(1) 一般消磁法的原理。假设在船舶外部临时敷设某种消磁线圈,在其中通以强大的恒定电流,这个电流将产生强大的磁场,当电流磁场与船体内部原有的固定磁性方向相反时,这个磁场从相反的方向磁化船舶,使其原有的固定磁性被消除,这便是一般消磁法。一般消磁法是一种历史悠久的消磁方法,因其操作简单,目前在某些场合仍然被使用。按消磁线圈的敷设方式,一般消磁法可分为一般纵向消磁法、一般横向消磁法和一般垂向消磁法。下面简单介绍各种一般消磁法。

(2) 一般纵向消磁法。如果我们粗略地认为船舶磁场的 $Z_x + Z_{px}$ 分量相对于船首和船尾对称于船中, Z_{px} 分量从船首到船尾成正弦形分布。按照这样的假设,分解出的 Z_{px} 的最大值超过一定值,可采用一般纵向消磁法将 Z_{px} 消除。当采用一般纵向消磁法时,临时绕制的消磁线圈应从船首到船尾绕成螺旋管型,如图 8.3-1 所示。

(3) 一般横向消磁法。当船舶有两个以上的舷下测量点上的 Z_{py} 超过标准而且在同一舷的符号相同时,可采用一般横向消磁法将 Z_{py} 消除。当采用一般横向消磁法时,临时绕制的消磁线圈应绕在船舶两舷的舷侧,如图 8.3-2 所示。

(4) 一般垂向消磁法。用临时绕制的水平消磁线圈消除船舶磁场 Z_{ix} 分量的方法称为一般垂向消磁法。一般垂向消磁法的使用条件为,当船舶 Z_x 分量超过标准时可采用一般垂向消磁法将其消除,但装有消磁系统的船舶一般不允许采用一般垂向消磁法。采用一般垂向消磁法消磁时,临时消磁线圈绕成一组水平线圈,如图 8.3-3 所示。

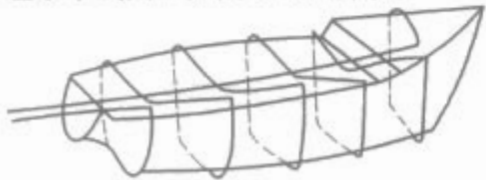


图 8.3-1 一般纵向消磁法所采用的螺旋管线圈

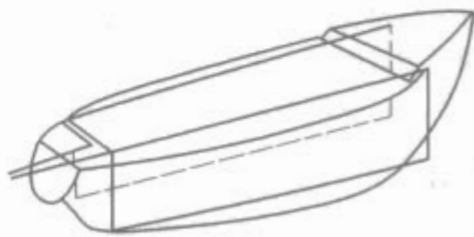


图 8.3-2 一般横向消磁法所采用的舷侧线圈

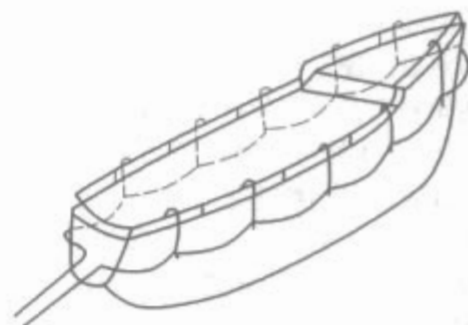


图 8.3-3 一般垂向消磁法所采用的水平线圈

消磁时到底采用哪一种一般消磁法要由船舶磁场的状况而定。如果只有某一个磁场分量超过标准就采用消除该分量的对应方法。如果有两个分量超过标准就分别采用对应的两种方法。如果三个分量都很大,都超过标准,那么三种消磁方法都要采用,此时应按照先横向、后纵向、最后垂向的顺序进行一般消磁。

(5) 一般消磁法的消磁程序。

1) 船舶原始磁场的测量和分析计算。首先要测量船舶的原始磁场,分析计算船舶磁场的各个分量以便确定是否需要消磁,以及应该采用哪种消磁方法。

船舶磁场的测量应在指定的航向上进行,测量点的位置按规定标定。对于首次消磁或没有航向差的船舶应在四个主航向上测量,从所测到的数据中求出航向差。对于已知航向差的船舶一般在两个相互垂直的主航向测量即可。通常是先在南北航向测量磁场,并立即求出 Z_{py} 。如果 Z_{py} 超过消磁标准,则在此航向上进行横向消磁,以消除 Z_{py} 。然后将船舶转到东或西航向,究竟是转到东航向还是转到西航向要由 Z_{py} 的符号来决定,当 Z_{py} 左舷为负时应转到东航向,当 Z_{py} 右舷为负时则应转到西航向,总之要使 Z_{py} 和 Z_{iy} 在该航向上符号相反,以便在通电消磁时使地磁水平分量有助于对 Z_{py} 的抵消。在东西航向上测量磁场之后,要立即算出 Z_{px} 和 Z_x 分量的值,如果 Z_{px} 和 Z_x 超过标准则在此航向上进行纵向和垂向消磁。在特殊情况下(如受场地或时间限制,不能反复掉转航向,或对该型船舶的磁性处理有相当的实践经验并已知航向差),可在一个主航向上进行磁场测量和分析计算,并在此航向上进行各种消磁处理。

2) 绕缆。根据磁场测量和分析计算结果,可以确定采取什么消磁方法,因而绕什么样的消磁线圈。如果在某一航向上需要同时绕几种消磁线圈,通常是将几种消磁线圈一次绕成,纵向线圈要紧贴船体绕在最里层,舷侧线圈次之,水平线圈绕在最外面。

一般消磁船(站)都配备两种以上规格的电缆,其中较粗的是截面为 185mm^2 或 240mm^2 的电缆,较细的是截面为 70mm^2 或 95mm^2 的电缆。通常纵向线圈用小截面电缆。

纵向消磁时,纵向消磁线圈的绕法见图8.3-1,其各匝间的距离可以是均匀的,也可以不均匀,这要看舰艇的形状和通电时船体各部分的磁化效果,要从实践中不断摸索各种船舶纵向消磁时所用纵向线圈位置的规律。位置确定得好,消磁效果就好,过密将加大绕缆的工作量,过疏则消磁效果不好。绕纵向消磁线圈时应注意每匝线圈都要与船舶的首尾线垂直,避免倾斜,各匝间的连接线应与电源线并在一起,使其产生的磁场互相抵消。

横向消磁时按图8.3-2所示绕制舷侧线圈,舷侧线圈要敷设在船舶的两舷,左右对称,线圈平面应平行于船舶的纵剖面,不得倾斜,线圈要尽量靠近两舷。

垂向消磁时所用的水平线圈见图8.3-3,通常使用绳索将线圈悬挂在船舶满载吃水线附近,并能使线圈上下移动自如,水平线圈敷设的圈数则视 Z_x 分量的大小而定,同样注意不要使线圈倾斜,并尽量使线圈紧靠船体。

3) 通电进行磁性处理。通电消磁处理步骤:要按先横向、后纵向、最后垂向的顺序进行通电消磁。一个分量处理好之后再处理另一个。但在每一个分量的通电处理过程中,处理的步骤都是相似的。即先进行磁场的“颠倒”,再把“颠倒”后的磁场“抵消”到消磁标准之内。

所谓“颠倒”就是在消磁线圈中通一个较强的电流,通电线圈产生的磁场与原来被消磁的船舶磁场方向相反,通电结束后原来的磁场被反向,其数值达到原来磁场的若干倍。如果这个磁场未达到所要求的数值则应加大电流,继续在反方向磁化船舶。颠倒的磁场也不宜过大,否则不但会造成抵消的困难,而且会使抵消后的磁场在某一时间内向颠倒的方向变化,以至于超过消磁标准。

所谓“抵消”就是在消磁线圈中通与颠倒方向相反的电流,使被颠倒的磁场逐渐减小。开始时可先从0.2倍的颠倒电流值通起,然后逐渐增加电流值。抵消时电流的增加要谨慎,不得抵消过度使磁场在原来的磁场方向超过标准,否则应重新进行颠倒和抵消。

4) 检查测量和分析计算消磁结果。当船舶通电处理之后,接着要进行检查测量。一般就在消磁处理的航向上进行全面的测量,必要时还要在相差 90° 的另一航向上进行测量。测出数据后要计算出各个分量,并算出 $\Delta(Z_x + Z_{px})$ 和 Z_{py} 。看 $\Delta(Z_x + Z_{px})$ 和 Z_{py} 是否在消磁标准规定的指标之内。如果消磁结果满足了消磁指标则消磁结束。

以上介绍的消磁过程并不是绝对的,可以根据具体情况灵活应用。

1.2 一般消磁法中的几个问题

(1) 消磁时要正确选择消磁方法。在消磁工作中,应该选择正确的消磁方法进行消磁,否则不但会给消磁工作带来麻烦,而且还会影响结果磁场的稳定性。

1) 当船舶磁场的各个分量不规则时,如 Z_{py} 分量在同一舷侧有正有负,又如 $Z_x + Z_{px}$ 分量多次过零点时,则不能采用一般消磁法,而必须采用综合消磁法。对装有消磁系统的船舶,其 Z_{px} 分量由于某种原因发生变化,用主绕组已不能充分补偿时,必须采用综合消磁法使 Z_{px} 恢复到原始状态,这样有利于磁场的稳定性。

2) 当船舶具有不大的纵向或局部纵向、不大的横向或局部横向磁场时,可采用垂向消磁法的提缆措施进行处理,

这样可以大大简便绕缆和通电过程。但当船舶具有较大的纵向或局部纵向、较大的横向或局部横向磁场时,则不可单纯用垂向消磁法的提缆措施处理,必须用纵向、局部纵向、横向、局部横向消磁。

(2) 用一般消磁法消磁时要正确利用地磁水平分量的作用。在用一般消磁法消磁时,除了消磁线圈的电流磁场对船舶有磁化作用外,地球磁场对船舶也有磁化作用。在实际消磁时可以看到这样的现象:如果船舶在南北航向上进行横向消磁时,地磁水平分量 H 可以影响 Z_{px} 使其发生变化,在东西航向上进行纵向消磁时, H 可以影响 Z_{py} 使其发生变化,影响的程度与 H 的大小、消磁线圈所通电流的大小、船舶本身的因素等有关。如果消磁时不考虑上述的影响则可能使已经消到标准的 Z_{px} 、 Z_{py} 分量又超过标准。反之,如果掌握了这个规律,则可利用这一现象,对 Z_{px} 、 Z_{py} 起到进一步的抵消作用。

地磁水平分量 H 的最大值为 $42\mu\text{T}$,是一个弱磁场,通常只能引起船舶产生感应磁化,而不会引起船舶固定磁场的变化,那么为什么在一般消磁过程中 H 会使固定磁场发生变化呢?如前所述,固定磁场的变化是不可逆的,只有在受到外界较强的磁场作用时,即外界磁场提供了相当大的能量时,才能克服船舶铁磁物质内部的阻力,使固定磁场发生变化。如果只有 H 作用,则克服不了这个阻力,因此船舶不能产生不可逆磁化,也影响不到船舶固定磁场的变化。而当消磁线圈通电时,线圈电流产生的磁场比较强,提供的能量足以克服这个阻力,此时 H 与线圈磁场共同作用的结果,就会在 H 方向上产生不可逆磁化作用;这就使该方向上的固定磁场发生了变化,当然这个变化比线圈磁场方向上的变化要小得多。由此可以看出, H 越大,影响越大,消磁线圈电流越大,影响越大。在船舶各个方向上 H 的影响也不相同,通常,对纵向磁场的影响大,而对横向磁场的影响则比较小。另外强烈的机械振动(爆炸、大风浪、修理)也可提供相当的能量,起到克服船舶铁磁物质内部阻力的作用,此时地磁场也会影响船舶固定磁场的变化,这就是为什么要在消磁后对船舶进行检查测量或重新消磁的原因。

(3) 磁性处理时磁场颠倒的作用。在一般消磁法中如果仅考虑消磁标准所要求的数值,则在通电过程中只需要一个抵消步骤就行了,为什么要先颠倒再抵消呢?这是为了提高结果磁场的稳定性。如果不先颠倒而直接抵消,船舶磁场将很容易恢复,以至于在经过较短时间后就又超过了消磁标准。如果采用先颠倒再抵消的消磁步骤则结果磁场恢复得慢,需要较长时间才能超过消磁标准。实践证明,颠倒的程度越大磁场的稳定性越好。但是颠倒的倍数也不能过大,否则,在磁性处理后的最初一段时间磁场将向颠倒的方向变化。

图8.3-4表明颠倒程度对磁场恢复快慢的影响,为了保

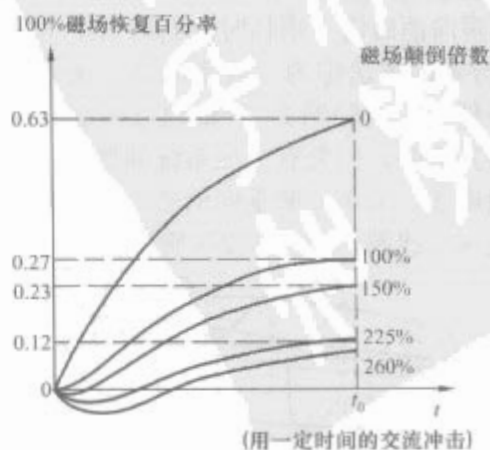


图 8.3-4 船模磁场恢复百分率

证消磁后的船舶磁场在一定时间内保持稳定,就必须对原始磁场先颠倒再抵消,其颠倒值要控制在 200%~280% 的范围内。

1.3 局部消磁法

有时因为船舶某些部位上的铁磁物质很集中,或因船舶某部分改装修理,或因在一般垂向消磁中各测量点的磁场变化速度不同等,使得该部位的磁场显得很大,对这种情况需要采用局部消磁。局部消磁从原理上分也属于一般消磁(前述的一般消磁指的是抵消整个舰艇磁场,而局部消磁指的是抵消船舶某些局部磁场)。局部消磁按被消除的分量可分为局部垂向消磁、局部纵向消磁、局部特殊纵向消磁和局部横向消磁。下面对各种局部方法分别作介绍。

(1) 局部垂向消磁。当船舶磁场的垂直分量 Z_z 值出现局部峰值或在一般垂向消磁处理实施中(颠倒或抵消时),某些测量点上的磁场变化速度不同时,可采用局部消磁法。

临时线圈的敷设仍为水平线圈,只不过对要处理的局部采用水平线圈提缆或放缆的办法。

提缆就是在水平线圈通电的同时,将要局部处理处的线圈部分,沿着船舷逐渐提上一定高度,通完电后再把该部分水平线圈恢复原来位置。在电流不变的情况下,提缆高度越大,磁场变化越大,此外各点的提缆高度可以不一样,要根据各点的磁场情况具体决定。提缆时应注意两舷线圈高度要一致,否则线圈倾斜会影响 Z_{py} 分量。

有时还可以采用放缆措施,如个别点已合格,而大多数点还相差较远,此时采取提缆措施比较麻烦,并可能满足不了需要。一旦出现这些情况必须增大线圈中的电流。为了避免已经合格的点超过要求,可将该处电缆深放到水下,或收到甲板上并拢,使其对船舶不再起磁化作用。

(2) 局部纵向消磁。当船舶磁场 Z_{px} 分量在局部区域内有明显的正弦波形时,如图 8.3-5 所示,可采用局部纵向消磁法处理。

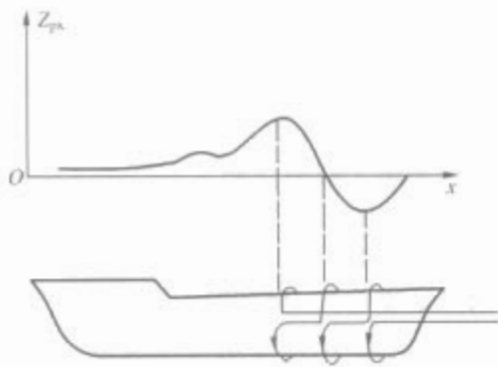


图 8.3-5 临时纵向局部线圈

(3) 局部特殊纵向消磁。当局部区域内出现复杂的局部纵向磁场时,如图 8.3-6 所示,应采用局部特殊纵向消磁。

通电处理时,不必进行磁场颠倒,可直接进行抵消。

当局部纵向磁场或局部特殊纵向磁场不很大时,可用一般垂向消磁法改变该部位的水平线圈形状来消除。这样可以

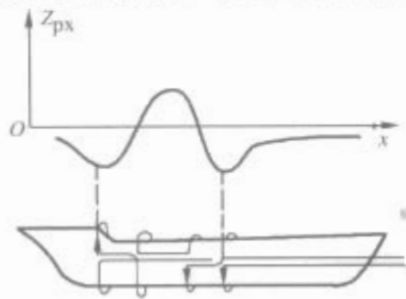


图 8.3-6 临时纵向局部线圈

简便消磁手续。但此时线圈中的电流只能由一般垂向消磁来决定。

(4) 局部横向消磁。当船舶舷下 Z_{py} 磁场分量不是所有点都超过标准,而只有少数点超过标准时,可采用局部横向消磁。

1.4 综合消磁法

综合消磁法用一个初始振幅足够大、正负交替、幅值逐渐衰减、变化缓慢的交变磁场将船舶的固定磁性消除。

(1) 交变磁场最大振幅的估算。第一次所加的磁场必须足够大,大到能够把所有的磁畴都转到外磁场方向上去。把刚好使所有磁畴都转到外磁场方向上去的磁场称作最大临界场,最大临界场约为矫顽力的 1.4 倍。用 H_m 和 H_c 分别表示最大临界场和铁磁物质的矫顽力,则

$$H_m = 1.4 H_c \quad (8.3-1)$$

对于具有一定形状的物体而言,还必须考虑到其退磁因素,用退磁系数 N 表示,则所需的磁场应为

$$H_m = 1.4 H_c (1 + \chi_m N) \quad (8.3-2)$$

(2) 交变磁场的频率估算。所加磁场的时间越长,磁场越能渗透到铁磁物质的内部,对铁磁物体的磁化越有效,但从通最大电流开始到电流接近于零,断电为止所用的时间也越长,耗费的能量也越大。但是如果在每个通电方向通电时间过短,即交变磁场的频率过高,磁场还没有来得及到达铁磁物体的内部就变化方向了,这样磁场只停留在铁磁物体的表面上,达不到消磁的效果,因此交变磁场的频率不能过高。

图 8.3-7 是一块金属板其厚度为 d ,在板上均匀绕制线圈,当线圈中通交变电流时,磁场将从两边向金属板内渗透,设磁场渗透到金属板的中心的强度为表面磁场强度的 e^{-1} ,此时的频率为

$$f = \frac{1}{\pi^2 \sigma_m \mu d^2} \quad (8.3-3)$$

式中: σ_m 为材料的电导率; μ 为材料的磁导率。

称此时的频率为临界频率,交变磁场的频率最高不能超过临界频率。

在实际中所用交变磁场的频率远远低于上面的算出的临界频率。从一个正脉冲开始到负脉冲结束大约为 15~20s,即实际频率为 $f = \frac{2\pi}{15 \sim 20}$ 。

(3) 振幅衰减率的估算。在用交变磁场消磁时,交变磁场幅值衰减不能过快,否则相当于在第一个振幅的方向附加了一个恒定磁场,消磁过程变成了无磁滞磁化过程,除非特殊需要,这是不希望看到的。

(4) 无磁环境的制造。在用交变磁场消磁时,需要把船舶放在一个没有外磁场的环境中,必须将地球磁场补偿掉。

1.5 由消磁船对船舶实施综合消磁的步骤

如果对船舶的磁性处理是由消磁船来完成,则船舶磁场的测量必须在专门的测量场地进行,而且必须在船上临时绕制消磁线圈。

一个完整的消磁过程如下:

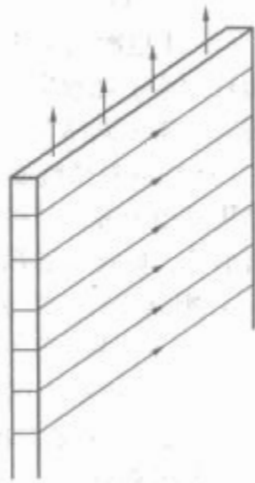


图 8.3-7 金属板的磁化的

(1) 确定测量方案。船舶是首次消磁还是非首次消磁,如果是首次消磁,则应在四个主航向上测量原始磁场,以便准确地分析出纵向航向差和横向航向差。最后一次测量应在南或北航向上。

(2) 调试测磁仪,确定测量点的数量位置,给磁探头缆绳作标记。

(3) 确定临时消磁线圈的类型和绕法。一般应选在南北航向消磁,在船上绕三种消磁线圈,即工作线圈,纵向补偿线圈和垂向补偿线圈。如果是在东西航向消磁,则在船上绕工作线圈、横向补偿线圈和垂向补偿线圈。

(4) 工作线圈总安匝量的估算和绕法。工作线圈应绕成螺线管形状,当螺线管很长时,其中部的磁场强度为

$$H = \frac{AW}{L} \quad (8.3-4)$$

式中: AW 为总的安匝量; L 为船舶的长度, m ; h 为磁场强度, A/m 。如果磁场强度的单位采用 Oe , 则总的安匝量为

$$AW = \frac{1000}{4\pi} HL = 79.6 HL \quad (8.3-5)$$

例: 设所需交变磁场的最大振幅为 $12Oe$, 船长为 $158m$ 时, 则工作线圈的总安匝量为

$$AW = 79.6 \times 12 \times 158 = 150\,921 \text{ 安匝}$$

(5) 主电源输出功率判断。在对大型船舶消磁的过程中常出现功率不足现象, 消磁过程中磁场消不下去。为避免这种现象应事先判断消磁主电源能否产生足够的安匝量。

(6) 纵向补偿线圈安匝量的估算和绕法。纵向补偿线圈的作用是用来补偿消磁场地的地磁水平分量, 它也是绕成螺线管形状。假设消磁场地的地磁水平分量为 $0.4Oe$, 船长为 $158m$, 则纵向补偿线圈的总安匝量应为

$$AW = 79.6 \times 0.4 \times 158 = 5030 \text{ 安匝}$$

(7) 工作电流工作制的选择。

1) 老式消磁电源的工作制由电源的控制仪器所决定, 一般为等幅衰减。

2) 新型消磁主电源其输出一般用计算机控制, 最大电流、通电时间、断电时间、电流的衰减律和通电次数(或断电电流值)等都可作为控制参数在消磁现场由消磁工程师凭经验确定。

(8) 垂向补偿线圈的安匝量估算和绕法。垂向补偿线圈要绕在水线附近, 所需安匝量与船舶磁场大小和消磁场地的地磁纬度有关。如果副电源输出电流大也可减少匝数。

(9) 综合消磁过程。

1) 测量船舶磁场, 对船舶磁场进行分解, 判断是否需要消磁。

2) 绕缆。

3) 确定各路补偿线圈电流的初始值。

4) 通电消磁。

5) 再次测量船舶磁场, 判断磁场是否已经达到标准, 如果没有达到消磁标准, 则改变纵向和垂向补偿线圈的电流, 再次通电消磁, 直到达到消磁标准为止。

(10) 稳定磁场的测量。船舶磁场消到合格之后, 要在原来的方向上稳定 $12h$ 再进行测量, 此时测得的磁场称为稳定磁场。如果稳定磁场仍然合格, 则结束对船舶的磁性处理。

1.6 在固定消磁站对船舶进行综合消磁的步骤

固定消磁站对船舶磁场的测量一般不再采用提拉探头的方式, 而是采用行车方式或探头阵列方式, 测量速度大为提

高; 船舶在固定消磁站消磁, 不必临时在船上绕制工作线圈和地磁补偿线圈, 这些消磁线圈作为消磁站设施在建站时均已固定在消磁站适当位置上。为了对各测量点上的磁场进行控制, 垂向和横向地磁补偿线圈又都各自分成了许多区段。

对船舶进行首次消磁的一个完整的消磁过程为:

(1) 被消磁船舶的进站与原始磁场测量。

(2) 磁场数据的预处理。

(3) 计算 $Z_x + Z_{px}$ 和 Z_{py} 判断船舶是否需要消磁。

(4) 通电消磁。

1) 确定工作线圈电流的工作制。

2) 各路地磁补偿线圈通以经验电流。

3) 工作线圈通电, 通电结束后补偿线圈断电。

4) 测量船舶磁场。

5) 计算 $Z_x + Z_{px}$ 和 Z_{py} 判断船舶是否需要继续消磁。

如果需要继续消磁, 则改变补偿线圈中的电流, 工作线圈再通电, 结束后断开补偿线圈中的电流, 再测量船舶磁场, 然后判断其是否需要继续消磁, 如此继续下去直到船舶磁场达到要求为止。

2 消磁电源

消磁电源分消磁主电源和消磁副电源。通常, 在综合消磁时, 给工作线圈供电的电源叫消磁主电源。在消磁船上对船舶进行一般消磁时也是应用这一电源。消磁主电源的脉冲功率常达数千千瓦, 电流常达几千安培。消磁副电源是给补偿线圈供电的, 虽然容量较小, 但所需电源的数量较多, 尤其在固定消磁站上, 为了分区段给消磁线圈供电, 消磁副电源的数量常有几十套。

2.1 消磁主电源及其设备

(1) 消磁主电源电流波形要求。消磁主电源应能提供下述电流波形:

1) 可输出单个脉冲电流。单个脉冲电流波形(见图 8.3-8):

a. 最大幅值: I_H 额定电流、 U_H 额定电压。

b. 静差: 电流额定值与断电时的电流值之差 (ΔI), 对额定值之比, 不大于 10% 。

c. 超调: 电流最大峰值与额定值之差 ($I_{max} - I_H$), 对额定值之比, 不大于 8% 。

d. 振荡现象: 接通、断开时均不大于一次。

2) 可输出正负交替间歇衰减的脉冲电流。能输出从额定电压 U_H , 额定电流 I_H , 开始每次递减 (100 ± 40) A , 脉冲 $5s$, 间歇 $20 \sim 2s$, 共 50 或 40 次的正负交替间歇衰减的脉冲, 最小电流不大于 $50A$ 。

(2) 消磁主电源设备。消磁主电源设备主要包括两种形式: 晶闸管整流设备、直流发电机组。

1) 晶闸管整流设备。固定消磁站的消磁主电源多采用晶闸管整流电源设备, 由岸电网或交流发电机组提供交流

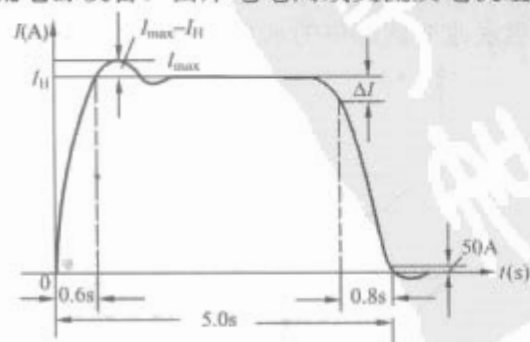


图 8.3-8 单个脉冲电流波形

电能。这种方案具有结构简单、运行可靠、无噪声、成本低等优点。

2) 直流发电机组。主消磁发电机组的工作特点是断续脉冲通电制。如果按最大脉冲功率选择柴油机, 将导致安装功率过大, 得不到充分利用; 如果选得过小, 则当输出最大脉冲功率时, 机组转速下降过多, 将出现排气冒黑烟, 热负荷增加过大(油温、水温 and 燃烧室温度)等现象, 显然不合理。为此, 可在柴油机-发电机组的传动轴上加装飞轮来解决这种矛盾。当机组空载起动后, 飞轮被加速到额定转速。由于高速旋转, 飞轮储存了大量的能量, 当需要输出超负荷时, 飞轮释放能量, 补偿机组功率的不足。输出电流脉冲后, 整个机组又处于空载状态, 于是飞轮又被加速到额定功率, 重新储存能量, 以此反复循环下去。

因此, 在选择柴油机、发电机和飞轮时, 要使它们之间得到合理的匹配。

2.2 消磁副电源及其设备

(1) 消磁副电源电流波形要求。综合消磁时, 向补偿线圈供电的电源为消磁副电源。对该电源的要求是输出电流稳定, 输出电压调节方便。

(2) 消磁副电源设备。消磁副电源主要由晶闸管整流设备构成。

3 消磁场地

3.1 消磁场地的选定

(1) 选择磁干扰少的场所。消磁场地所选择的场所, 最重要的是选定磁场变动少的地方。需要充分调查选择因输电线、重型机械厂等产生磁干扰少的地方, 尤其是离高压输电线远的地方。还要考虑在地质上磁性小的地层, 避免铁矿石等强磁性物质的干扰, 要求环境磁场均匀, 场地不均匀度应不大于 2mOe。

(2) 场地海域要求。水深应超过最大目标船舶的标准测量深度 2m 以上; 使用便携式测磁仪测量船舶磁场时, 海水流速不超过 0.5 节, 平潮时间长, 避风; 场地宽敞, 有利于船舶机动。

(3) 场地周围的条件。远离主要道路、大型建筑物和航道等, 特别是供电电力设备应离开场地至少 50~100m。在半径 200m 范围内不应有沉船、铁锚等强磁性干扰源。

3.2 临时绕缆消磁场地的设施建设

场地内要有定向水鼓 3~6 个, 使船舶便于系在东、西、南、北四个主航向上。如图 8.3-9 为具有三个水鼓的消磁场地, 被消磁船舶可以在南北和东西两个航向上系缆停泊。如图 8.3-10 为具有六个水鼓的消磁场地, 能够满足船舶四航向和八航向消磁要求。其中, 1、2、5、4 号水鼓组成一个大消磁场地, 供大型船舶消磁使用; 2、3、6、5 号水鼓组成一个小消磁场地, 供小型船舶消磁使用。

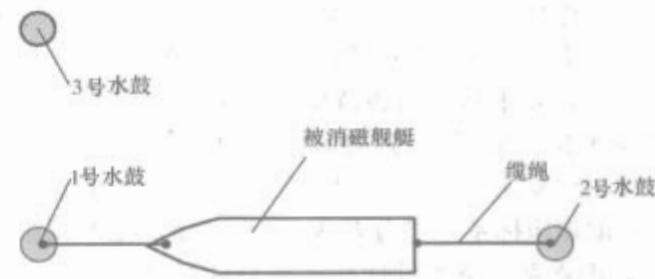


图 8.3-9 三个水鼓的消磁场地

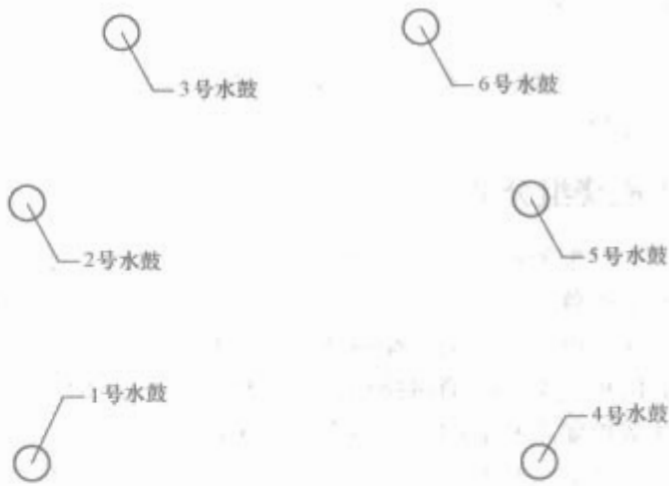


图 8.3-10 六个水鼓的消磁场地

3.3 固定消磁站低磁建筑物的磁性控制

进行各种磁测定时必须做到: 既要减少测定空间的磁场畸变, 同时要抵消掉磁场的变动, 以便排除给磁测定带来的干扰。因此, 磁测定设施必须做成非磁性建筑物, 所用的建筑材料应尽量非磁性化, 并且要竭力避免建筑物所在场地的外部磁干扰。



第4章 船舶消磁绕组

船舶为抵御水中磁性武器的攻击、减少船舶的磁特征信号,一般装备消磁系统。消磁系统用于补偿船舶的感应磁场和剩余固定磁场。对于高磁性防护要求的船舶,还用于补偿涡流磁场。迄今为止,在钢质船舶上安装消磁系统是船舶磁性防护的最有效手段。消磁绕组是消磁系统的核心组成部分,其设计水平直接影响到船舶整体磁性防护能力。

针对船舶垂向、纵向、横向三个方向的固定及感应磁性磁场(在船舶坐标系下可分解为18个分量,见本篇第1章3.3节),消磁系统绕组设计和考核只针对其中的6个垂向分量 ΔZ_{px} 、 Z_{ix} 、 ΔZ_{py} 、 Z_{iy} 、 ΔZ_{pz} 和 Z_{iz} 。根据磁性磁场产生原理及以往设计、调试经验,当有效补偿这6个垂向分量后,其他在该平面上的12个分量均可得到较为满意的补偿效果。

如无特别说明,本章所述的船舶磁场均指船舶磁性磁场的垂向分量。

1 消磁绕组分类

不同类型的船舶,由于磁性防护要求的不同,对消磁绕组的要求也就不同,其设计方法、技术要求、结构特征等都有所不同。但是,根据船舶磁场的变化规律,不同类型的磁场只能用相应类型的消磁绕组进行补偿。船舶消磁绕组是根据磁性防护要求和船舶结构特点,由不同类型的绕组组合而成,如3绕组、4绕组、5绕组(其中含感应、固定、综合绕组等)。

1.1 感应绕组

船舶感应绕组用来补偿船舶的感应磁场。由于船舶感应磁场分别由地球磁场在船舶的垂向、纵向和横向三个方向磁化形成,所以消磁系统感应绕组主要是针对这三个方向的磁化而设置的,分别为垂向感应绕组、纵向感应绕组和横向感应绕组。

1.1.1 垂向感应绕组

1.1.1.1 垂向磁化感应磁场特点

(1) 船舶坐标系下,由地磁场垂向分量磁化产生的船外空间磁力线分布如图8.4-1所示。图8.4-2所示的是垂向磁化感应磁场垂向分量 Z_{iz} (以后简称垂向感应磁场)的分布规律。

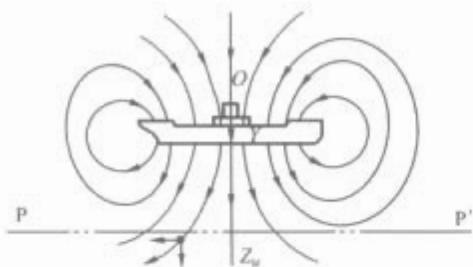


图 8.4-1 垂向磁化感应磁场磁力线分布

(2) 垂向感应磁场具有下述特点:

- 1) 龙骨线下和船舯面附近达到最大。
- 2) 船下投影平面磁场方向一致(北半球为正、南半球为负),超出船体投影平面有可能改变方向。

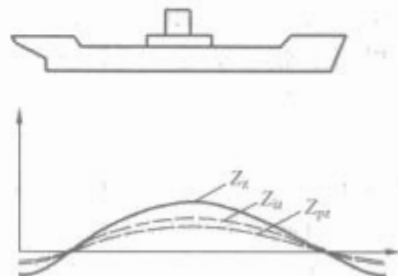


图 8.4-2 垂向感应磁场 Z_{iz} 的变化规律

3) 与地磁场垂直分量 Z_D 、水平分量 H_D 、磁偏角 D 、磁航向角 φ 、纵倾角 α 和横倾角 β 的关系为

$$Z_{iz}(x, y, z) = K_z(x, y, z) [-(\sin \alpha \cos \beta \cos \varphi - \sin \beta \sin \varphi) H_D + \cos \alpha \cos \beta Z_D] \quad (8.4-1)$$

其中 $K_z(x, y, z)$ 为船舶的垂向磁化系数,由船舶形状、船舶铁磁材料特性决定。

4) 在船舶保持水平状态下,由式(8.4-1)知

$$Z_{iz}(x, y, z) = K_z(x, y, z) Z_D \quad (8.4-2)$$

即在此条件下,垂向感应磁场与地球磁场垂直分量成正比,不随船舶航向改变而变化。

1.1.1.2 垂向感应绕组的一般形式

垂向感应绕组用来补偿船舶垂向感应磁场 Z_{iz} ,一般平行于主甲板水平面敷设,如图8.4-3所示,通常用ZQ表示(或用ZH或M表示),它所产生的磁场如图8.4-4所示,用来补偿船舶垂向感应磁性磁场 Z_{iz} 。

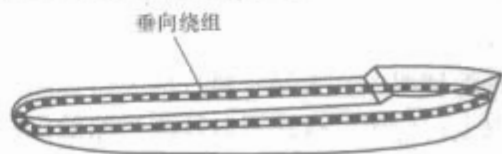


图 8.4-3 垂向绕组的一般形式

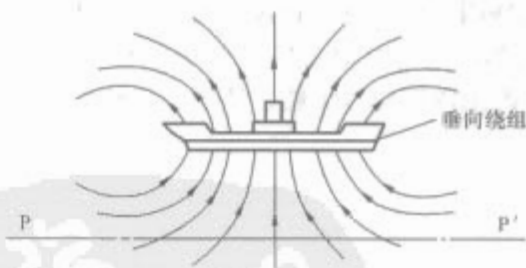


图 8.4-4 垂向绕组产生的磁力线分布

1.1.1.3 双层和三层垂向感应绕组

为了使垂向绕组产生的磁场形状尽量与船舶垂向磁场形状相同,使其补偿效果更佳,通常大型船舶采用双层或三层垂向感应绕组,包括上层垂向绕组 ZQ_s 及下层垂向绕组 ZQ_x 或上层垂向绕组 ZQ_s 、下层垂向绕组 ZQ_x 及中层垂向绕组 ZQ_{zh} 。

1.1.2 纵向感应绕组

1.1.2.1 纵向感应磁场变化特点

(1) 船舶坐标系下,由地磁场纵向分量磁化后船外空间磁力线分布如图8.4-5所示。图8.4-6所示的是纵向磁化磁场垂向分量 Z_{ix} (以后简称纵向感应磁场)的分布规律。

(2) 纵向感应磁场具有下述特点:

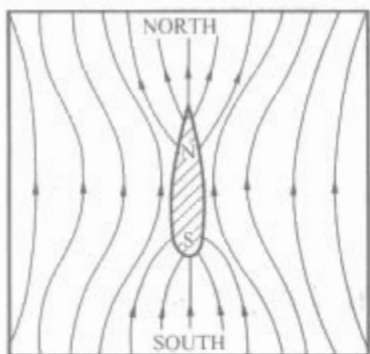


图 8.4-5 纵向磁化后的磁力线分布

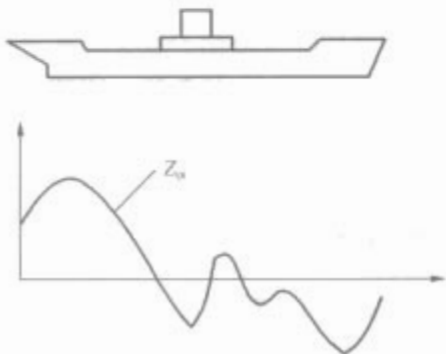


图 8.4-6 纵向感应磁场 Z_{ix} 的分布规律

- 1) 龙骨线下和船舶艏附近磁场值达到最大。
- 2) 船艏附近磁场值反号，即当船部磁场为正时、艏部磁场为负，反之，船部磁场为负时，艏部磁场为正。
- 3) 与地磁场垂直分量 Z_D 、水平分量 H_D 、磁航向角 φ 、纵倾角 α 和横倾角 β 的关系为

$$Z_{ix}(x,y,z) = K_x(x,y,z)[\cos\alpha\cos\varphi H_D + \sin\alpha Z_D] \quad (8.4-3)$$

式中： $K_x(x,y,z)$ 为船舶的纵向磁化系数，由船舶形状、船舶铁磁材料特性决定。

- 4) 在船舶保持水平状态下，由式 (8.4-3) 知

$$Z_{ix}(x,y,z) = K_z(x,y,z)H_D\cos\varphi \quad (8.4-4)$$

即在此条件下，纵向感应磁场与地球磁场水平分量成正比，随船舶磁航向改变成余弦变化。

1.1.2.2 纵向感应绕组的一般形式

纵向感应绕组用来补偿船舶纵向感应磁场 Z_{ix} 。根据纵向感应磁场船尾符号相反的特点，一般有两种型式的补偿绕组，纵向水平绕组和纵向肋骨绕组。

(1) 纵向水平绕组分别由船舶的船部和艏部沿平行于主甲板水平面敷设的两部分绕组组成（分别称为 F 绕组或 Q 绕组），一般用 XP 表示（或用 F_i - Q_i 表示），如图 8.4-7 所示。船、艏区段磁场电流正负交叉连接，呈 ∞ 形，使得产生的磁场船艏相反，绕组磁场补偿纵向感应磁场 Z_{ix} 的补偿效果如图 8.4-8 所示。

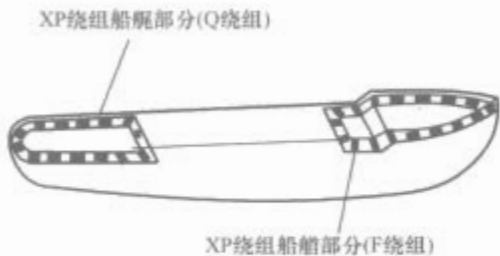


图 8.4-7 XP 绕组的敷设示意图

由于 XP 绕组只针对船舶外围空间的 Z_{ix} 进行补偿，在船舶内部产生的磁矩与纵向感应磁矩的方向不一致，所以对其他分量 X_{ix} 和 Y_{ix} 的补偿效果远没有下面介绍的纵向肋骨绕组好。

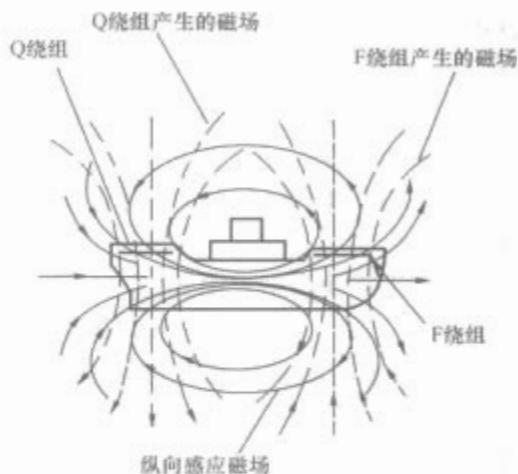


图 8.4-8 XP 绕组的磁场补偿方式

(2) 纵向感应肋骨绕组沿船舶肋骨面敷设，如图 8.4-9 所示，一般用 XL 表示（或用 HL 或 L 表示）。由于纵向感应肋骨绕组在船舶内部产生的磁场与纵向感应磁矩相反，在补偿 Z_{ix} 的同时，对其他分量的补偿效果比 XP 绕组好，但工艺复杂，电缆长度及功率消耗较大，磁场补偿设计、调整难度大，且绕组磁场难以调控，一般只有经验丰富的设计人员才可采用该绕组对 Z_{ix} 进行补偿。



图 8.4-9 肋骨绕组敷设示意图

1.1.3 横向感应绕组

1.1.3.1 横向感应磁场变化特点

(1) 船舶坐标系下，由地磁场横向分量磁化后船外空间的磁力线分布如图 8.4-10 所示。图 8.4-11 所示的是横向磁化磁场垂直分量 Z_{iy} （以后简称横向感应磁场）的分布规律。

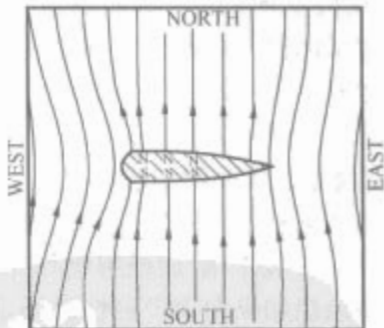


图 8.4-10 横向磁化后的磁力线分布

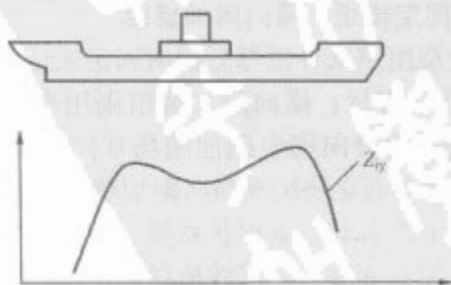


图 8.4-11 横向感应磁场 Z_{iy} 的变化规律

- (2) 纵向感应磁场具有下述特点：
 - 1) 龙骨线下为零，两舷附近磁场值达到最大。
 - 2) 两舷磁场值反号，即当右舷磁场为正时、左舷磁场

为负,反之,右舷磁场为负时,左舷磁场为正。

3) 与地磁场垂直分量 Z_D 、水平分量 H_D 、磁航向角 φ 、纵倾角 α 和横倾角 β 的关系为

$$Z_{iy}(x, y, z) = K_y(x, y, z) [(\sin \alpha \sin \beta \cos \varphi + \cos \beta \sin \varphi) H_D + \cos \alpha \sin \beta Z_D] \quad (8.4-5)$$

其中 $K_y(x, y, z)$ 为船舶的纵向磁化系数,由船舶形状、船舶铁磁材料特性决定。

4) 在船舶保持水平状态下,由式(8.4-5)知

$$Z_{iy}(x, y, z) = K_y(x, y, z) H_D \sin \varphi \quad (8.4-6)$$

即在此状态下,纵向感应磁场与地球磁场水平分量成正比,随船舶磁航向改变成正弦变化。

1.1.3.2 横向感应绕组形式

横向感应绕组用来补偿船舶横向感应磁场 Z_{iy} ,沿平行于船舶中纵剖面的纵向剖面敷设,如图 8.4-12 所示,一般用 YQ 表示(或用 HZ 或 A 表示)。为了改善其磁场的形状系数,使其补偿效果更佳,通常大型船舶采用双支线横向感应绕组(左支线 YQz 及右支线 YQy)或三支线横向感应绕组(左支线 YQz、右支线 YQy 及中支线 Yqzh)。

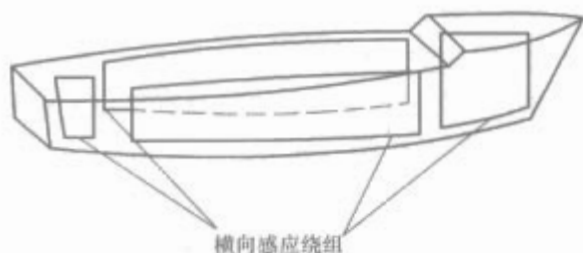


图 8.4-12 横向绕组敷设示意图

1.2 固定绕组、附加绕组

1.2.1 垂向固定绕组、垂向附加绕组

垂向固定绕组用来补偿部分垂向固定磁性磁场垂向分量 Z_{px} ,一般用 ZG 表示;垂向附加绕组则用来补偿船舶经临时线圈消磁后的剩余垂向固定磁性磁场垂向分量 ΔZ_{px} ,一般用 ZF 表示。垂向固定绕组及垂向附加绕组敷设路线同垂向感应绕组。为了改善其磁场形状系数,使补偿效果更佳,通常大型船舶采用双层垂向固定(附加绕组)[上层垂向绕组 ZGs(ZFs)及下层垂向绕组 ZGx(ZFx)]或三层垂向固定(附加绕组),上层垂向绕组 ZGs(ZFs)、下层垂向绕组 ZGx(ZFx)及中层垂向绕组 ZGzh(ZFzh)]。

1.2.2 纵向固定绕组、纵向附加绕组

纵向固定绕组用来补偿部分纵向固定磁性磁场垂向分量 Z_{px} ,一般用 XG 表示;纵向附加绕组则用来补偿船舶经临时线圈消磁后的剩余船舶纵向固定磁性磁场垂向分量 ΔZ_{px} ,一般用 XF 表示。纵向固定绕组及纵向附加绕组敷设路线同纵向感应水平绕组。

1.2.3 横向固定绕组、横向附加绕组

横向固定绕组用来补偿部分横向固定磁性磁场垂向分量 Z_{py} ,一般用 YG 表示;横向附加绕组则用来补偿经外消磁处理后的剩余船舶横向固定磁性磁场垂向分量 ΔZ_{py} ,一般用 YF 表示。横向固定绕组及横向附加绕组敷设路线同横向感应绕组。为了改善其磁场形状系数,使补偿效果更佳,通常大型船舶采用双支线或三支线横向固定(附加)绕组,包括左支线 YQz(YFz)及右支线 YGy(YFy)或左支线 YQz(YFz)、右支线 YGy(YFy)及中支线 YGzh(YFzh)。

1.3 垂向感应轻型绕组

用来补偿船舶垂向感应磁性磁场垂向分量 ΔZ_{ix} (磁性航

区为限定区域),一般用 ZQ 表示。中、小型船舶一般采用单层垂向感应轻型绕组。

1.4 局部绕组

用来补偿局部感应磁性磁场,可根据需要采用垂向、纵向、横向绕组。

2 消磁绕组布置的基本原则

消磁绕组产生的磁场能否与船舶磁场相吻合(磁场量值接近,方向相反),使得船舶龙骨或舷下的合成磁场均小于允许值,这与绕组布置位置的设计有着密切的关系。

当消磁绕组的设计路线需贴近露天甲板或外板时,应考虑绝缘层,并距离其 50mm 以便散热;当消磁绕组的设计路线需穿过油舱、水舱等液体舱室或有防爆、防干扰要求的舱室时,应考虑电缆穿管敷设。

2.1 垂向绕组的布置

2.1.1 单层垂向绕组的布置

小型船舶因其船体内部空间窄小,经实践经验证明,其垂向绕组可沿两舷最大的高度和宽度布置。最佳布置位置为距计算平面 $(0.91 \sim 0.95)B$ (B 为最大船宽)的高度。

2.1.2 多层垂向绕组的布置

目前,我国船舶尚未采用三层垂向消磁绕组结构,因而这里所讲的多层指双层。

大、中型船舶采用双层垂向绕组,上层回路应尽量布置得高和宽,下层回路应尽量布置得低和窄,下层回路的宽度一般取上层回路的一半,这样可在不消耗较大能耗的情况下,使绕组磁场的形状系数具有较好的调整性,能更好地补偿船舶磁场。最佳布置位置:上层距计算平面的高度为 $(1.1 \sim 1.2)B$,下层距计算平面的高度为 $(0.75 \sim 0.85)B$ 。

2.2 纵向绕组的布置

2.2.1 纵向水平绕组

纵向水平绕组的布置原则与单层垂向绕组相同。

2.2.2 纵向肋骨绕组

纵向肋骨绕组由沿船舶横剖面敷设的螺旋管状绕组所组成,沿船长方向均匀分布,绕组间距一般为 $(0.2 \sim 0.7)B$,最好在测量点上,船艏两匝距船舶两端的距离要求小于 $0.1L$ (L 为舰船长度),绕组面积要求不小于安装肋骨面积的 80%。

2.3 横向绕组的布置

横向绕组一般采用双支线,以船舶的舢纵剖面为对称轴,左右支线沿纵剖面平行敷设。绕组上支线的位置越高越好,绕组下支线的位置越低越好。上下支线的距离一般不小于型深的 $2/3$ 。回路终端距船艏两端的距离通常不大于 $0.5B$ 。左右支线绕组之间的距离(横剖面)为 $(1/3 \sim 2/3)B$ 。

3 消磁绕组磁设计

(1) 消磁绕组的设计是消磁系统设计的主要内容,也是提高船舶磁防护能力的主要手段。消磁绕组设计包括磁设计和电设计两方面。

1) 消磁绕组设计原则。应根据总体研制任务书及系统规格书的要求开展相关设计工作。消磁绕组设计阶段分为方案设计、技术设计、施工设计三个主要阶段。在方案设计阶段,进行消磁绕组粗略磁电计算,从而搭建消磁系统的初步

框架结构;在技术设计阶段,开展消磁绕组磁电计算,以支撑整个系统的各个子系统的设计工作全面展开;在施工设计阶段,根据消磁绕组敷设的实际情况,进行消磁绕组磁电计算局部调整。

2)在消磁绕组磁设计中,先进行船舶磁场形状系数的计算,然后根据船体的结构特点,分析、计算绕组磁场的形状系数,进而确定绕组的敷设位置坐标。只要绕组磁场形状系数与船体磁场形状系数相吻合,且绕组有足够的安匝量,船舶磁场就能得到较好的补偿。

(2)船舶磁场形状系数,定义船舶某横断面舷下或舷外某点产生的磁场与龙骨下产生的磁场的比值为该横断面下的磁场形状系数

$$A(x) = \frac{Z_g(x)}{Z_g(g)} \quad (8.4-7)$$

每一区段绕组在同样电流作用下在龙骨下测量点上和舷下测量点上产生的磁场大小是不一样的,如图8.4-13所示。

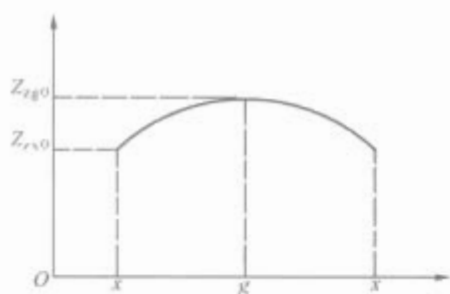


图8.4-13 绕组磁场沿船舶横方向分布

(3)消磁绕组磁场形状系数,定义某绕组在船舶某横断面舷下或舷外某点产生的磁场与该绕组同样电流龙骨下产生的磁场的比值为该绕组磁场的形状系数 $A_W(x)$

$$A_W(x) = \frac{Z_{gW}(x)}{Z_{gW}(g)} \quad (8.4-8)$$

3.1 磁性航区、标准测量深度及测量点

3.1.1 磁性航区的确定

(1)磁性航区为装备有消磁系统的船舶所限定的磁纬度航区。

(2)对于大型船舶,磁性航区一般设定为全球范围(两极地除外)航行,即:

1)地磁场水平分量 $H_d = 0 \sim 42 \mu T$ 。

2)地磁场垂向分量 $Z_d = -60 \sim 60 \mu T$ 。

(3)中、小型船舶的磁性航区一般设定为某一限定的航区内。

3.1.2 标准测量深度的确定

(1)标准测量深度由满载吃水线算起并以船舶最大宽度的倍数来表示。

(2)标准测量深度一般以船舶的最大宽度 B 为单位计算, $H = kB$, k 为规定的比例系数。

(3)根据对船舶在四个主磁航向不同深度平面上磁场的分析可知,在较浅的测量深度上,船舶的局部磁场较为明显,磁场曲线波动突出;随着测量深度的增加,磁场逐步衰减,局部磁场衰减更快,在大于一定的深度平面上,磁场特性曲线开始变得较为光滑,使得船舶磁场容易得到最佳和合理补偿。

3.1.3 磁性测量点的确定

3.1.3.1 提拉测磁筒测量方式

船舶磁性测量点沿船长方向均匀分布,二测量点间的距

离一般不超过 $0.7B$ (B 为最大船宽),并在艏艉处适当增加测量点。龙骨正下方一直线、左右舷沿船体型线弧形分布。一般为龙骨下13~27点,左右舷各5~17点,基本上等距分布,以反映船的磁特性全貌。

3.1.3.2 大平面测量方式

船舶下方测量深度平面上,磁性测量点沿船长方向均匀分布,一般按船宽方向至少5条线布设矩阵阵列。

3.2 消磁系统设计输入数据

3.2.1 船舶磁场原始数据

船舶磁场原始数据是船舶消磁系统设计的依据。一般根据以下两种方法来确定:

(1)选取主尺度、吨位、建造材料磁特性都相近的实船作为母型船,根据其磁场数据,经过综合分析、数据修正,从而确定被设计船舶的磁场原始数据。

(2)按所需比例建造磁性船模。通过磁性船模试验,在船模磁场数据的基础上,确定被设计船舶的磁场原始数据。

3.2.2 母型船磁场换算

3.2.2.1 船舶主尺度不同引起的换算

在设计船和母型船主尺度相近的情况下,可根据母型船的磁场曲线,沿船长方向将船长分为 n 等分,按相似原则,沿设计船横坐标的各个分点,取相应母型船各个分点的磁场值,即

$$Z_{s1} = Z_{m1}, Z_{s2} = Z_{m2}, Z_{s3} = Z_{m3}, \dots, Z_{sn} = Z_{mn}$$

连接设计船各个分点的纵坐标,即可得到设计船的设计曲线。

3.2.2.2 船舶测量深度不同引起的换算

(1)经验公式法。磁场垂向分量随深度变化的经验公式为

$$H_{z2} = H_{z1} \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^x \quad (8.4-9)$$

当深度 h 在 $(0.5 \sim 1.5)B$ 范围内时,将 h_1 深度上的磁场向下换算到 h_2 深度,指数 x 取1.5;当深度 h 在 $(2 \sim 5)B$ 范围内时,指数 x 取2.5;当深度 h 大于 $5B$ 范围内时,指数 x 取3。

式中: H_{z1} 为深度 h_1 船舶磁场强度的垂向分量值; H_{z2} 为深度 h_2 船舶磁场强度的垂向分量值。

(2)曲线换算法。根据计算分析得出的磁场随深度换算曲线来进行船舶磁场的深度换算。

3.2.3 数学建模和物理建模

(1)数学建模方法,基于空间中的磁场规律符合麦克斯韦方程,静态磁场磁通势满足拉普拉斯方程,在一定边界条件下,通过有限元法、边界元法和积分方程等方法计算不同深度磁场。也可以通过等效源法,经过已知平面磁场的拟合,求得等效源分布后计算其他平面磁场。

(2)物理建模,物理建模的主要条件:

- 1)磁性船模与实船的几何尺寸的比例相同。
- 2)磁性船模与实船的钢板材料的磁化率相同。
- 3)磁性船模与实船的铁磁物质分布一致。
- 4)磁性船模的磁路必须连续。

3.3 消磁绕组磁场的设计

在消磁绕组设计方面,开发大型计算和设计软件已成为必然。对于新造船舶,根据其铁磁物质分布、磁导率等就可计算其感应磁场,在此基础上设计消磁绕组,可使得

消磁系统补偿余量更趋合理,避免不必要的能耗。同时,在首次消磁时,在确保测量准确的前提下,不需要进行四个航向的测量就可得到其航向差,这对于大型船舶其优越性更为明显。

有了船舶的原始磁场、舷下各点对应绕组的铁磁系数以及各绕组区段磁场的理论计算效率,便可对绕组进行调整计算,求解各绕组安匝值,以验证消磁绕组设计的合理性。

3.3.1 绕组设计理论依据

3.3.1.1 载流导线的磁场

根据静磁场理论,载流导线在距离为 r 的 p 点处所产生的磁感应强度和磁场强度由毕奥—沙伐定律确定,分别为

$$dB = \frac{\mu_0 Idl \times r}{4\pi r^3} \quad (8.4-10)$$

$$dH = \frac{Idl \times r}{4\pi r^3} \quad (8.4-11)$$

式中: μ_0 为真空中的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; B 为磁感应强度, T; H 为磁场强度, A/m。

图 8.4-14 所示的一段载流直导线在周围空间所产生的磁场强度由下述定积分公式给出

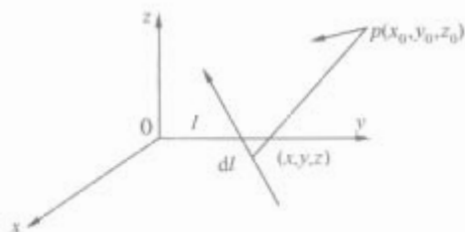


图 8.4-14 载流直导线的磁场

$$\begin{aligned} H(x_0, y_0, z_0) &= \frac{1}{4\pi} \int_A \frac{dl \times r}{r^3} \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(y_0 - y)k - (z_0 - z)j}{[(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dx + \\ &\quad \frac{1}{4\pi} \int_{y_1}^{y_2} \frac{(z_0 - z)i - (x_0 - x)k}{[(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dy + \\ &\quad \frac{1}{4\pi} \int_{z_1}^{z_2} \frac{(x_0 - x)j - (y_0 - y)i}{[(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{3/2}} dz \end{aligned} \quad (8.4-12)$$

式中: r 为空间点 (x_0, y_0, z_0) 到 (x, y, z) 之间的距离。

$$r = [(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2]^{1/2}$$

当载流直导线与某个坐标面或坐标轴平行时,上述积分公式可得到一些简化。例如,当载流直导线与 XOY 面平行时,(8.4-12)式简化为

$$\begin{aligned} H(x_0, y_0, z_0) &= \frac{I}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{(y_0 - y)k}{r^3} dx - \frac{I}{4\pi} \int_{y_1}^{y_2} \frac{(x_0 - x)k}{r^3} dy - \\ &\quad \frac{I}{4\pi} (z_0 - z) \left[\int_{x_1}^{x_2} \frac{j dx}{r^3} - \int_{y_1}^{y_2} \frac{i dy}{r^3} \right] \end{aligned} \quad (8.4-13)$$

当载流直导线与 X 轴平行时,(8.4-12)式简化为

$$H(x_0, y_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} [(y_0 - y)k - (z_0 - z)j] \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{r^3} \quad (8.4-14)$$

总之,只要知道载流直导线的端点坐标,就可以比较方便地计算出空间任一点的磁场。

3.3.1.2 多边形载流线圈的磁场

如图 8.4-15 所示,一个由若干直线段组成的多边形载流线圈回路,在空间任一点 (x_0, y_0, z_0) 所产生的磁场可视为每一段载流直导线在该点产生的磁场的叠加。因此,只要应用式(8.4-11)或式(8.4-12)或式(8.4-13),算出各段直导线的磁场,然后再进行叠加,就可以得到多边形载流线圈的磁场。

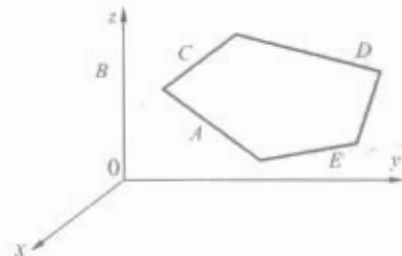


图 8.4-15 多边形载流线圈

3.3.1.3 绕组磁场

无论补偿哪种磁场分量的消磁绕组都是由若干安匝区段构成的。任何一个安匝区段都可等效为一个空间多边形,各个空间多边形磁场的组合就构成了绕组的磁场,绕组设计的关键是要计算出各独立区段的磁场并将它们进行合理的组合,以便在所有测量点上都能较好地抑制船舶磁场。

3.3.2 绕组磁场确定

地磁场对船舶的磁化可分解成三个方向的磁化,即纵向磁化、横向磁化和垂向磁化。无论是哪种磁化产生的磁场,除与地磁水平分量 H_D 和垂向分量 Z_D 有关外,还和船舶的航向角 φ 、纵倾角 α 、横摇角 β 及测量点的坐标有关。在地磁纬度及上述 φ 、 α 和 β 确定时,不同测量点上的磁场则仅由测量点的坐标所决定。

在测量平面上,垂向感应磁场 Z_{ix} ,纵向感应磁场 Z_{ix} 和横向感应磁场 Z_{iy} ,在船舶艏艉线方向的分布与从左舷外到右舷外的分布,大致如图 8.4-16~图 8.4-21 所示。

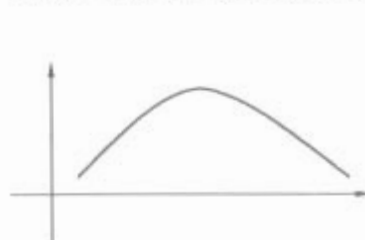


图 8.4-16 Z_{ix} 沿船舶的艏艉线分布

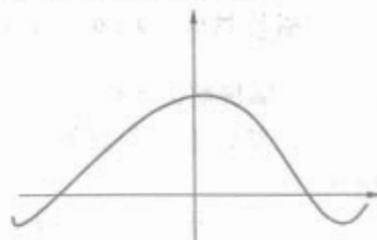


图 8.4-17 Z_{ix} 沿船舶的横向分布

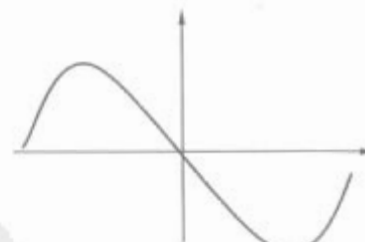


图 8.4-18 Z_{ix} 沿船舶的艏艉线分布



图 8.4-19 Z_{ix} 沿船舶的横向分布

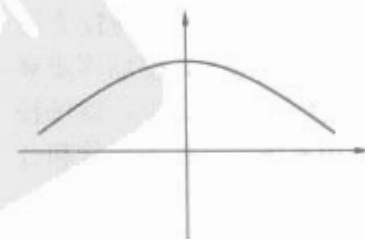


图 8.4-20 Z_{iy} 沿船舶的艏艉线分布

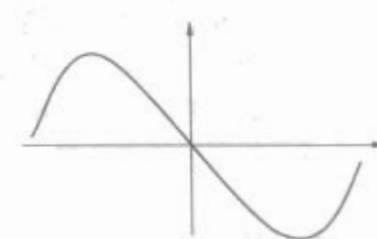


图 8.4-21 Z_{iy} 沿船舶的横向分布

消磁绕组产生的磁场在任何时刻均应与船舶磁场的形状相同,但方向相反,即 ZQ 绕组磁场在纵向与横向呈图 8.4-16 和图 8.4-17 的分布;XP 和 XL 绕组磁场在纵向与横向呈图 8.4-18 和图 8.4-19 的分布;YQ 绕组磁场在纵向和横向呈图 8.4-20 和图 8.4-21 的分布。

船舶磁场的设计采用值按本章第 3.2 节分析获得。

3.3.3 绕组区段划分原则

(1) 根据安匝曲线的特征、总体舱室布置、铁磁物体分布等情况划分区段。

(2) 先选取大、中区段,再选取小区段。

(3) 铁磁物质较集中的舱室划分为一个区段,而铁磁物质分布相差较大的两个舱室则不应划分在同一区段内。

(4) 划分区段时既要考虑节约电缆,又要考虑便于调整。

(5) 绕组的横跨线最好选在舱室隔壁或沿船体结构处通过,并要求绕组的横跨线要高于绕组面。

3.3.4 绕组敷设位置设计原则

(1) 垂向主绕组 ZQ 用来抵偿船舶感应磁场 Z_L 分量,为了调整绕组的磁场形状系数,提高补偿效果,将其分成上层回路 ZQs 和下层回路 ZQx,沿水平方向敷设、上下两层串联。

(2) YQ 绕组对称布于两舷,各区段基本上与中线面平行。上支线紧靠 1 甲板下方,与 ZQs 两舷的敷设路线相同,该位置不易受损、具有一定的安全性。

(3) 各绕组电缆尽量敷设在一起,这样可少占空间,也便于施工。

(4) 为使绕组的磁场与船舶磁场形状接近,各绕组从艏至艉分成若干区段,船舶磁场变化剧烈的地方,区段分得细一些,磁场变化缓慢的地方,区段可划分得疏一些。

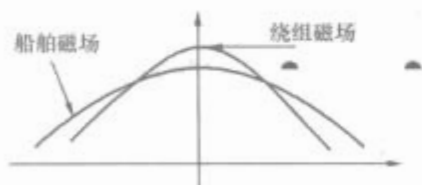


图 8.4-22 绕组磁场补偿效果

(5) 在消磁系统设计中,是用任一横剖面中两舷和龙骨下的三个点的磁场,考核绕组磁场与船舶磁场的吻合程度。设船舶磁场的形状系数为 A_s ,绕组磁场的形状系数为 A_w ,一般 A_w 和 A_s 是不等的,故在调整绕组的磁场时必须兼顾龙骨下和两舷下的补偿结果,使之在龙骨下呈欠补偿而两舷下呈过补偿状态,如图 8.4-22 所示(为方便比较,这里将绕组磁场曲线镜像表示)。

1) 设龙骨下船舶磁场为 Z_L ,绕组应产生的磁场为 Z_w 。 Z_w 的大小应满足

$$Z_L - Z_w = Z_w A_w - Z_L A_s$$

或

$$Z_w = \frac{(1+A_s)Z_L}{(1+A_w)} \quad (8.4-15)$$

2) 定义补偿形状误差为

$$ER_A = Z_L - \frac{(1+A_s)Z_L}{1+A_w} = \frac{(A_w-A_s)Z_L}{1+A_w} \quad (8.4-16)$$

3) 如果差值 ER_A 的值小于允许值,则不必考虑敷设下层绕组问题,否则就必须敷设下层绕组。通过调整上下层绕组之间的安匝比,达到龙骨下和舷下均能充分抵消之目的。

例:在某肋骨面上绕组磁场之形状系数 $A_w=0.86$, Z_{ix} 在龙骨下的值为 $2.4\mu T$,舷下值为 $1.9\mu T$, $A_{sx}=0.8$, Z_{ix} 在龙骨下的值为 $5.6\mu T$,舷下值为 $4.2\mu T$, $A_{sz}=0.75$,设计规定由于形状系数不同产生的误差不能大于 $0.3\mu T$,判别是否需要安装双层绕组。

① Z_{ix} 的形状误差为

$$\Delta Z_{ixA} = \frac{(0.86-0.8) \times 2.4}{1+0.86} = 0.077\mu T$$

② Z_{iz} 的形状误差为

$$\Delta Z_{izA} = \frac{(0.86-0.75) \times 5.6}{1+0.86} = 0.33\mu T$$

③ 结论:对 XP 绕组没有必要敷设下层绕组,而对 ZQ 绕组则应敷设下层绕组。

3.3.5 绕组各区段安匝数计算

3.3.5.1 数学理论方法

将测量点按照左舷下艏部至艉部、龙骨下艏部至艉部、右舷下艏部至艉部的顺序编号,设共有 m 个测量点,船内有 n 个独立的消磁区段。第 i 个区段单位安匝在第 j 个测量点上产生的磁场以 $a_{j,i}$ 表示。第 j 个测量点上的船舶磁场为 YQ_j ,第 i 个区段的安匝数为 AW_i 。在理想情况下,在每个测量点上各绕组区段的磁场之和应恰好等于船舶磁场。据此可列出方程组

$$\begin{aligned} a_{1,1}AW_1 + \cdots + a_{1,i}AW_i + \cdots + a_{1,n}AW_n &= YQ_1 \\ &\vdots \\ a_{j,1}AW_1 + \cdots + a_{j,i}AW_i + \cdots + a_{j,n}AW_n &= YQ_j \\ &\vdots \\ a_{m,1}AW_1 + \cdots + a_{m,i}AW_i + \cdots + a_{m,n}AW_n &= YQ_m \end{aligned} \quad (8.4-17)$$

在这个方程组中 $a_{j,i}$ ($j=1,2,\cdots,m, i=1,2,\cdots,n$) 是由测量点坐标、绕组区段形状和坐标所决定的常数, AW_i ($i=1,2,\cdots,n$) 是未知的待求量, YQ_j ($j=1,2,\cdots,m$) 是设计船磁场。一般情况下测量点数 m 总大于绕组区段数 n ,故上述方程组是一个线性矛盾方程组。通过解矛盾方程组可以求得各区段安匝数的近似解。

3.3.5.2 单位安匝磁场的计算方法

任何一个安匝区段都可近似成一个空间多边形,多边形的每条边都是一段通电直导线。空间导线的磁场用式 (8.4-12) 计算。该区段在某测量点上的单位安匝磁场即为各段直导线磁场之和。设计时只要测量出各测量点的坐标及各多边形顶点的坐标,即可算出各区段在各测量点的单位安匝磁场,有了各区段的单位安匝磁场及船舶磁场就可求出各区段的安匝数。

(1) 龙骨下取 21 个测量点,两舷下各取 9 个测量点,各测量点的布置及编号如图 8.4-23 所示。

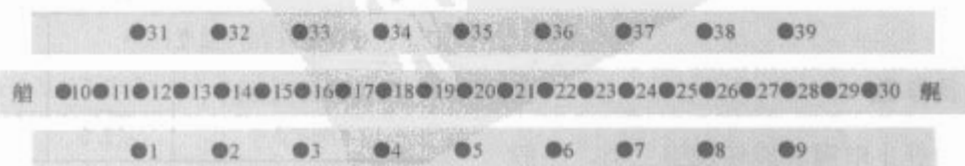


图 8.4-23 测量点布置及编号

(2) 建立直角坐标系,取船舶中心为坐标原点,船艏至船艉方向为 x 方向,左舷至右舷为 y 方向,垂向向下方向为 z 方向。

(3) 定义

$$AW_1 = \alpha w(Z_C + \Delta Z) \quad (8.4-18)$$

$$AW_2 = \alpha w(Z_C - \Delta Z) \quad (8.4-19)$$

式中: αw 为绕组单位磁场安匝; Z_C 为绕组补偿的船舶磁场值; ΔZ 为规定的绕组磁场补偿误差。

(4) 根据计算得出的绕组安匝 AW_1 、 AW_2 值,绘制出临界安匝曲线。

(5) 由于绕组布于船内,它的磁场要受到船壳的屏蔽作用,同时对附近的铁磁物体又产生磁化作用,因此计算得到的单位安匝磁场与实际值会有差异,因而算出的各区段安匝数与实际所需要的安匝数也将有所不同。所以各区段的实际安匝应根据船模测量的单位安匝磁场进行计算修正。

(6) 铁磁物质对消磁绕组效率的影响,可通过磁性船模试验获取。在磁性船模上按照确定的绕组坐标数设单匝消磁绕组,测出通电时的消磁绕组磁场,同通过理论计算所得的空心绕组磁场进行比较,其比值即为铁磁系数。

3.3.6 绕组单位安匝磁场测量

(1) 设测量点数为 m ,区段数为 n 。在消磁系统断电情况下,测量船模磁场以 Z_{j0} ($j = 1, 2 \cdots m$) 表示。

(2) 将第一个区段接到电源上,将电流调到 I_0 ,再测量各测量点上的磁场,以 Z_{j1} 表示。

(3) 将第二个区段串在第一个区段上,将电流调到 I_0 ,再测量各测量点上的磁场,以 Z_{j2} 表示。

(4) 用同样方法继续完成其他绕组磁场的测量和记录:

1) 将 $i+1$ 区段串接在第 1, 2, ..., i 区段上,将电流调到 I_0 ,再测量各测量点上的磁场,以 $Z_{j,i+1}$ 表示。

2) 将第 n 区段串接在第 1, 2, ..., $n-1$ 区段上,将电流调到 I_0 ,再测量各测量点上的磁场,以记 $Z_{j,n}$ 表示。

(5) 设第 i 区段 ($i = 1, 2 \cdots n$) 的匝数为 W_i ,则第 i 个区段在第 j 个测量点上的单位安匝磁场

$$a_{j,i} = \frac{(Z_{j,i} - Z_{j,i-1})}{I_0 W_i} \quad (8.4-20)$$

3.3.7 绕组各区段实际所需安匝数取用

(1) 依据船舶磁场及各区段的单位安匝磁场计算各区段实际所需的安匝数。

(2) 设该地磁纬度区该绕组的电流为 I ,第 i 个区段的安匝数为 AW_i 则实需匝数为

$$W_{ei} = \frac{AW_i}{I} \quad (8.4-21)$$

(3) 在各接线盒调出各区段的实需匝数并将它们串接在一起。测量绕组的磁场,计算各测量点上的误差,若发现局部点上误差偏大,则参照管辖该测量点的区段的单位安匝磁场,再做少许调整。

4 消磁绕组电设计

4.1 确定消磁电源类型及参数

消磁电源设备一般分为静止电源和旋转机组二类,一般输入 380V 三相交流电,输出双向直流电。静止电源在快速

响应、冗余备份、高可靠性和维护性等方面具有明显优势,近年来采用较多。消磁电源设备的输出功率根据磁计算得出的安匝需求量来确定。

4.2 绕组电缆的选择

船舶消磁系统总体设计另一项重要工作内容是选择电缆,也是绕组设计的一部分,其设计流程如图 8.4-24 所示。

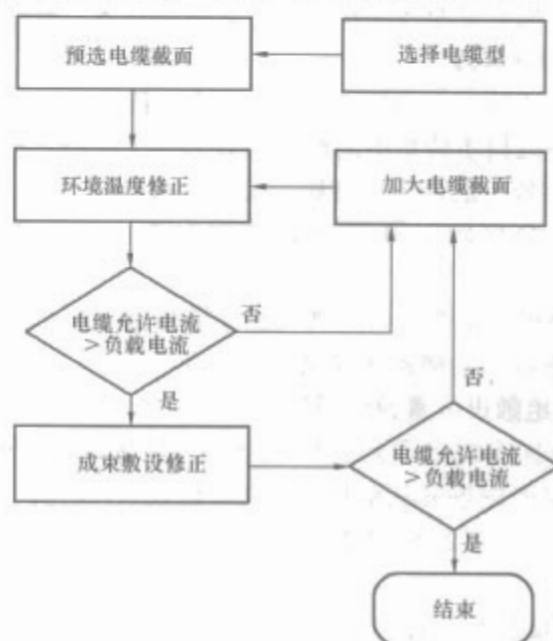


图 8.4-24 消磁电缆选择的一般流程

4.2.1 电缆选择原则

(1) 消磁系统设计要选用无卤、低烟、低毒成束阻燃船舶用电线,根据使用要求,按电缆的用途、敷设位置和工作条件选择电缆牌号,尽量减少电缆规格和品种。

(2) 电缆的额定电压应不低于使用该电缆的电路的标称电压。电缆的最高允许工作温度应至少比电缆敷设场所的平均最高环境温度高 10°C 。同一舰船上应尽量选用相同的耐温等级的电缆,否则耐温等级相差超过 5°C 的电缆应分束敷设。如果这样有困难,则成束中所有电缆的额定电流都应按耐温等级最低的电缆载流量考虑。

(3) 电缆在敷设路径中有机械防护或屏蔽要求时应选用带金属编织套的铠装电缆。

(4) 电缆敷设在露天甲板或机舱等可能潮湿的处所或金属铠装层需单点接地时应具有防蚀性护套。

4.2.2 电缆的允许电流

选择电缆时,必须根据使用条件,保证电缆实际通过的电流低于其允许电流。电缆的允许电流,是取决于电缆的绝缘材料,并以最高允许温度为基准决定的,是以电缆通过电流时散热量和导体产生的热量平衡状态决定。

根据国际电工委员会 IEC 60092—201 (1994)《系统设计—总则》规定,单芯电缆允许电流的计算式为

$$I = \alpha S^{0.625} \quad (8.4-22)$$

式中: I 为单芯电缆的允许电流, A; S 为导体标称截面, mm^2 ; α 为最高允许温度下的绝缘材料系数,如表 8.4-1 所示。

表 8.4-1 绝缘材料系数表

导体最高允许温度 ($^{\circ}\text{C}$)		60	75	80	85	95
导体标称截面积 (mm^2)	≥ 2.5	9.5	13.5	15	16	18
	< 2.5	8	13	15	16	20

各种绝缘材料的允许工作温度如表 8.4-2 所示:

表 8.4-2 绝缘材料允许工作温度表

绝缘材料	最高允许工作温度(℃)
聚氯乙烯(一般)	60
聚氯乙烯(耐热)	75
丁基橡胶	80
乙丙橡胶和交联聚乙烯	85
硅橡胶和无机物	95

根据公式计算,各种绝缘材料的单芯电缆连续工作的电流定额列入表 8.4-3。双芯及多芯电缆的连续工作电流的电流定额,是将表 8.4-3 中的电流定额乘以修正系数求得。

双芯电缆的修正系数为 0.85;三芯和四芯电缆的修正系数为 0.70。

表 8.4-3 单芯电缆连续工作的电流定额表
(环境温度 45℃)

标称截面积 (mm ²)	普通用途 的聚氯乙烯(A) (60℃)①	耐热聚氯乙烯(A) (75℃)①	丁苯橡胶 (A) (80℃)①	乙丙橡胶 和交联聚 乙烯(A) (85℃)①	硅橡胶和 矿物绝缘 (A) (95℃)①
1	8	13	15	16	20
1.5	12	17	19	20	24
2.5	17	24	26	28	32
4	22	32	35	38	42
6	29	41	45	48	55
10	40	57	63	67	75
16	54	76	84	90	100
25	71	100	110	120	135
35	87	125	140	145	165
50	105	150	165	180	200
70	135	190	215	225	255
95	165	230	260	275	310
120	190	270	300	320	360
150	220	310	340	365	410
185	250	350	390	415	470
240	290	415	460	490	—
300	335	475	530	560	—

① 导体的最高允许工作温度。

4.2.3 电缆取用的修正系数

不同环境空气温度的修正系数。

(1) 电缆的允许电流定额是表示标准环境下的值。

(2) 如果预计到电缆工作环境空气温度可能高于 45℃ 时,则应适当降低电缆的电流定额;如果电缆工作环境空气温度永久低于 45℃ (例如沿海船舶、轮渡和港口船等特种船舶) 时,则可适当增加电缆的电流定额。即以表 8.4-4 中所列的修正系数乘以标准环境温度 (45℃) 下的电流定额。

表 8.4-4 各种环境空气温度的修正系数表

导体 最高 温度 (℃)	环境空气温度的修正系数										
	35℃	40℃	45℃	50℃	55℃	60℃	65℃	70℃	75℃	80℃	85℃
60	1.29	1.15	1.00	0.82	—	—	—	—	—	—	—
65	1.22	1.12	1.00	0.87	0.71	—	—	—	—	—	—
70	1.18	1.10	1.00	0.89	0.77	0.63	—	—	—	—	—
75	1.15	1.08	1.00	0.91	0.82	0.71	0.58	—	—	—	—
80	1.13	1.07	1.00	0.93	0.85	0.76	0.65	0.53	—	—	—
85	1.12	1.06	1.00	0.94	0.87	0.79	0.71	0.61	0.50	—	—
90	1.10	1.05	1.00	0.94	0.88	0.82	0.74	0.67	0.58	0.47	—
95	1.10	1.05	1.00	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63	0.55	0.45

4.2.4 成束敷设的修正系数

(1) 按 IEC 60092—201 规定,敷设在单根导管或管道内,或者虽不密封在管内,但彼此并不分离的两根或多根电缆均为成束电缆。

(2) 对于成束敷设在电缆架上、电缆导管、管道或线槽内的电缆,可认为其电流定额是适用的,不用进行修正;但若同时以满载电流容量运行的六根以上的电缆成束紧靠敷设,使得其周围没有自然空气循环时,应乘以 0.85 的修正系数。

(3) 根据中国船级社 (CCS) 规定,下述场合可以不进行修正:不超过 6 根的电成束敷设在导板上,或管道、管子或电缆槽内。

(4) 超过 6 根的电成束按下列方式组合:

1) 在任何两组 6 根束集之间的距离应至少等于最粗电缆的直径。

2) 在任何两组三根约束集之间的水平及垂向距离应至少等于最粗电缆的直径。

4.2.5 消磁绕组选择

(1) 选用的消磁绕组电缆要求重量轻、功率消耗小、便于施工和维护保养等。选择电缆截面,除了要求电缆截面要满足载流量,更重要的是所选取电缆的总电阻值必须与设定的电缆电流值相匹配。

(2) 电缆截面的计算公式如下

$$q = \frac{\sum AWL}{\gamma U} \tag{8.4-23}$$

式中: q 为电缆截面, mm²; AW 为区段安匝数; L 为区段长度, m; γ 为电导率, m/Ω · mm²; U 为绕组电压, V。

(3) 为使所选电缆截面尽可能小,一般采用提高电压等级的方法,但最高不能超过 400V,因为,超过 400V 许多元器件的选择都会有大的变化。

(4) 也可利用电源线作为大区段或从一些小区段提取部分匝数作为中区段等手段,以减少电缆的回线长度,从而降低电缆截面。

(5) 根据所求得的计算电缆截面值,依照电缆样本取一近似整数。其后,求出各区段匝数和展开长度,并将设定电流代入以下公式,经过反复计算,使总电阻值与设定电流相匹配。电缆的芯数和导体截面规格可由有关产品样本中查得。计算式为

$$R = \frac{W'l + L}{\gamma q} \tag{8.4-24}$$

式中: $W'l$ 为各区段匝数和展开长度; L 为电源线长度。

(6) 消磁绕组电缆的选择还要注意以下几点:

1) 实际电流值要略大于设定值。

2) 各区段均应设一匝调整多芯线,以满足安匝调整性能。

3) 各区段的实际安匝数不小于设计安匝数,应留有一定的余量。

4) 小型船舶电缆截面积值一般不大于 10mm², 中型船舶一般不大于 70mm², 大型船舶电缆截面积值一般不大于 150mm²。

5 消磁绕组安匝调整

5.1 消磁绕组接线装置

(1) 用于小型船舶消磁绕组接线装置,由于整体结构外型不大,内部接线端子相对不多,线路相对简单,一般称为

消磁绕组接线盒。

(2) 用于中、大型船舶消磁绕组接线装置, 由于整体结构外型大, 内部接线端子多, 线路复杂, 一般称为消磁绕组接线箱。

(3) 消磁绕组接线盒与消磁绕组接线箱统称为消磁安匝调整器。

(4) 消磁绕组接线装置有多种型号, 可根据需要选择。

消磁绕组接线装置除了连接消磁绕组外, 还有一个更为重要的用途, 即进行绕组磁场的调整, 以使绕组磁场能够很好地补偿船舶磁场, 从而使船舶的合成磁场在规定的范围内, 保障船舶航行的安全性。

5.2 消磁绕组安匝调整方法

(1) 安匝调整的目的。

1) 消磁绕组的设计工作是在船舶的设计阶段完成的, 在船舶建造阶段安装到相应位置上, 虽然采取了若干措施获得船舶的磁性磁场, 如数学计算、船模试验、母型船磁场对比等, 但由于船舶磁场的复杂性, 设计阶段获得的船舶磁场不可能完全与船舶建造完成后的磁场完全一致。

2) 为了使消磁绕组产生的磁场以最佳方式补偿船舶的各种磁性磁场, 一方面在设计阶段必需留有一定余量和调整措施, 另一方面在实际船舶的磁性检测中, 安匝调整是及其重要的过程, 安匝调整实际上是调整不同消磁绕组产生的磁场形状, 使之与其要补偿的磁场形状相同。

(2) 安匝调整的基本数据。要进行船舶消磁系统的安匝调整, 必须具备一定的数据:

1) 船舶消磁系统的基本数据, 如绕组类型、绕组分布、绕组调整器分布和结构等。

2) 各绕组单位安匝磁场。

3) 调整地的地球磁场数据和调整时船舶的航向姿态数据。

4) 调整时船舶各种垂向磁场分量数据, 如船舶磁场的航向差、剩余固定磁场分量等。根据测量磁场获得不同磁场分量的方法见第1章3.3节。

其中1)、2)和船舶的航向差数据由设计或经一次测量便可作为船舶的基本数据保存, 其他数据在调整时获得。

(3) 消磁绕组调整步骤。根据消磁系统总体设计, 消磁绕组安匝调整可采取匝数调整、电流调整和匝数电流联合调整方式。

1) 匝数调整: 保持消磁电流不变, 改变区段匝数来调整本区段补偿磁场大小, 一般适用于消磁绕组串联集中供电消磁系统。

2) 电流调整: 保持该区段匝数不变, 用改变电流的方式调整本区段补偿磁场大小, 一般适用于区段绕组单独供电的消磁系统。

3) 联合调整: 通过既改变匝数又改变电流的方式调整补偿磁场, 一般适用于分区绕组供电的消磁系统。该消磁系统方案中, 全船消磁绕组分成若干大区供电, 每个大区中的消磁绕组又分区段串联供电。

消磁绕组的安匝调整是一种需要实际经验和理论基础的工作, 采取逐步逼近方法改变各安匝数据。也可通过计算机辅助计算加快调整速度和提高调整质量。



第5章 船舶消磁电源

船舶消磁电源是船舶消磁系统的重要组成部分,它接收消磁系统的电流控制信号,向消磁绕组提供高质量的消磁电流。

1 船舶消磁电源技术要求

作为船用电气设备,船舶消磁电源一方面要满足不同船型电气设备的通用技术要求,如环境条件、可靠性、可维修性和噪声、电磁兼容等,另一方面也必须满足该型船由于磁性防护特殊需求的技术性能要求,如静态精度、动态精度、暂态误差和负载适应性等。

1.1 消磁电源分类

按照船舶总体磁性防护要求,不同类型船舶需要的消磁电源类型不同,功率范围也有很大的区别。但是根据变流工作原理,可以将船舶消磁电源分为两大类,旋转电源和静止电源。

1.1.1 旋转式消磁电源

旋转式消磁电源是基于直流发电机式的机电式变流装置,可通过放大倍数较高的电机扩大机为直流发电机提供励磁控制信号,由直流发电机向消磁绕组供电,或直接由大功率的电机扩大机直接向消磁绕组供电。

1.1.2 静止式消磁电源

(1) 静止式消磁电源是将来自电网的直流电或三相交流电变换为双向可调直流电源的电能变换装置,其输出电流跟踪来自消磁电流控制仪器的给定信号的变化,向消磁绕组供电。

(2) 静止式消磁电源克服了旋转式消磁电源精度低、效率低、噪声大、动态性能差等缺点,更加适应船舶电磁防护的要求。

(3) 静止式消磁电源可以用数据通信的接口,大大减少控制连接线,提高了系统的可靠性和抗干扰能力。

1.1.3 设备规格

(1) 输出的直流电压(V): 110、220、400 或按总体设计具体规定。

(2) 输出的直流电流(A): 10、15、20、30、40、50、80、100、120、150、200 或按总体设计具体规定。

(3) 模块式电源单模块输出的直流电流(A): 10、15、20。输出的直流电流可达 500A。

1.1.4 消磁电源供电方式

消磁电源的供电方式为三相交流 50Hz、380V 的舰用电和岸用电。安装到船舶上或实验室试验时设备必须有良好的接地装置。当水下潜艇为直流供电时,可采用逆变器方式为消磁电源供电。

1.2 消磁电源设计要求

1.2.1 工作制

连续全天候。

1.2.2 可靠性

(1) 可靠性保证的工作。

1) 承制方按 GJB 450A—2004《装备可靠性工作通用要求》所应实施的工作。

2) 设计评审。

3) 可靠性预计。

4) 故障模式、影响和危害度分析。

5) 故障报告、分析和纠正措施系统。

6) 可靠性验证。

(2) 平均故障间隔时间。平均故障间隔时间(MTBF)不小于 4000h。

(3) 可靠性计算方法。

1) 可靠性预计应按 GJB 813—1990《可靠性模型的建立和可靠性预计》的规定。

2) 故障模式、影响和危害度分析应按 GJB 1391—1992《故障模式、影响及危害性分析程序》的规定。

3) 故障报告、分析和纠正措施系统应符合 GJB 841—1990《故障报告、分析和纠正措施系统》的规定。

(4) 可靠性验证。整机设备采用 120 小时长期运行试验。部件的可靠性验证试验采用 500h 加速寿命试验。

1.2.3 维修性

(1) 维修性保证的工作。

1) 承制方按 GJB 368A—1994《装备维修性通用大纲》所应实施的工作。

2) 设计评审。

3) 可维修性预计。

4) 维修性验证。

(2) 平均修复时间。平均修复时间(MTTF)不大于 0.5h。

(3) 维修性预计方法。

1) 设计评审应按 GJB/Z 72—1995《可靠性维修性评审指南》进行。

2) 维修性预计应按 GJB/Z 52—1994《功率型密封电磁继电器系列型谱》进行。维修性预计中应使用可靠性预计中采用的失效率数值。

1.2.4 互换性

功能相同的各通道(或称分量)应能在组件之间、设备之间互换。模块式消磁电源的各模块应能在模块之间互换。

1.2.5 安全性

系统、电气和结构方面的故障应不伤及人员和其他设备,并按 GJB 900—1990《系统安全性通用大纲》的要求实施。

1.3 基本功能

(1) 自动、手动功能。消磁变流装置应有手动和自动两种工作状态。自动工作状态是由消磁电流控制仪控制状态。手动工作状态主要用于维修整定,手动工作状态调整过程中不应突然断电,尽量减少电流冲击。

(2) 故障指示和保护。消磁变流装置应能在过电热、过电流、过电压、欠电压,变流装置内部功率器件、控制回路的短路,以及变流装置输出端的短路、断路等各种故障发生

时提供故障相应的显示、报警和保护。

(3) 自动限流保护。各输出回路负载电流自动限流值应整定在 $110\%I_e$, 并能保证当自动限流保护失效时变流装置的最大可能输出电流不大于 $150\%I_e$ 。

(4) 自冗余。当舰船具有特种要求时, 变流装置应有冗余的功能, 确保消磁系统不间断运行。其冗余的能力应根据可靠性的要求和实际运行过程中的要求确定。

(5) 热插拔。当变流装置有冗余的功能时, 变流装置的关键模块、部件应有热插拔的功能。故障时, 为了保证变流装置可靠性和舰船的安全性必须完成带电维修。

(6) 控制信号接口。为适应各种消磁电流控制仪的配套和选型, 消磁变流装置应由多种接口, 如模拟接口、RS422 接口、CAN 总线接口等。

1.4 技术性能要求

1.4.1 负载适应能力

(1) 负载范围。

1) 电阻值为 $50\%R_e \sim 100\%R_e$ (R_e 为消磁绕组的电阻值)。

2) 电感值为 $0 \sim 100\text{mH}$ 。

(2) 负载值变化。当绕组热态阻值增大 20% 及舰船消磁调整器操作阻值减少 20% 时, 应不影响输出电流的精度。

(3) 负载调整范围。为适应各类型舰船消磁系统, 变流装置应提供的可调电压范围为 $50\%U_e \sim 100\%U_e$, 整流变压器至少有 2 个以上的抽头, 以供实船安装时调整。

1.4.2 功能检验

(1) 自动/手动检验。

1) 自动状态工作时, 变流装置应按照控制仪器给出的信号输出相应的电流。

2) 手动状态工作时, 变流装置应按照手动控制给出的信号输出相应的电流。

3) 人为设计相应的故障, 变流装置应显示相应的故障或类别并具有相应的保护。

(2) 自动限流保护检验。当控制信号超出额定值的 10% 时, 变流装置应保持输出额定值的 110% , 并有相应的报警显示。

(3) 自冗余检验。人为设计相应模块的故障, 变流装置应实现冗余, 并显示相应的故障位置或类别并具有相应的保护, 输出精度不变。

(4) 热插拔检验。根据故障显示的模块, 应能直接拔出更换模块。

(5) 控制接口检验。根据接口的种类单独进行控制, 变流装置应能实现相应输出, 输出精度不变。

1.4.3 电气性能

(1) 输出精度和纹波。

1) 输出精度: 输出精度分仪器输出精度、变流装置输出精度和系统输出精度。

2) 纹波: 负载电流在 $0 \sim 100\%I_e$ 范围内任何一处均应保证输出电流峰值纹波值限定在标准内。

3) 输出电流峰值纹波值计算公式如下

$$q = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_e} \quad (8.5-1)$$

式中: q 为输出电流纹波系数; I_{\max} 为输出电流峰值, A; I_{\min} 为输出电流谷值, A; I_e 为输出电流额定值, A。

(2) 谐波电流。变流装置在额定值工作时, 所产生的

2~32次谐波线电流应不大于满负载的基波电流的 3% , 32次至 20kHz 的电流不大于满负载的基波电流的 $(100/n)\%$ (n 为谐波次数)。

(3) 介电强度。相间、相地 2500V 有效值 50Hz 正弦波 1min 不应出现闪烁击穿, 带有电力电容的部件应拆除或短接。

(4) 泄漏电流。泄漏电流不大于 5mA , 否则应设明显警告牌和可靠接地后才可通电。

(5) 绝缘电阻。绝缘电阻冷态时不小于 $20\text{M}\Omega$, 热态时不小于 $10\text{M}\Omega$ 。

(6) 温升。变压器、电抗器按要求的温升考核, 电子器件按实际工作温度考核。

1.4.4 环境要求

(1) 温度。

1) 静止式变流装置: 环境温度为 $0 \sim 55^\circ\text{C}$, 运行过程中应能承受 70°C 空气温度 2h 而不误动作。

2) 旋转式变流装置: 环境温度为 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 。

(2) 空气相对湿度。空气相对湿度为 95% 并有凝露的情况下正常工作。

(3) 盐雾、油雾、霉菌。变流装置的各部件均能抗盐雾、油雾、霉菌性能。

(4) 摇摆、倾斜。水面舰艇为 $\pm 45^\circ$, 周期 $3 \sim 14\text{s}$, 倾斜 $\pm 15^\circ$ 。

(5) 冲击。应能承受舰船自身武器发射、弹头命中船体或水下非接触爆炸所引起的垂向、横向和纵向的冲击。

(6) 振动。应能承受舰船航行时引起的和其他机械工作时引起的局部振动。

1.4.5 外壳防护型式

静止式变流装置采用防滴式。

1.4.6 电磁兼容性

符合 GJB 151A—1997《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》中的要求。

2 旋转式消磁电源

旋转式消磁电源采用交磁式电机扩大机及直流发电机作为功率放大元件, 通过控制电机扩大机的激励实现对消磁电流的控制。电机扩大机是一种特殊的直流发电机。它既有较大的放大倍数又有较小的惯性, 工作也比较稳定可靠, 因而在消磁电流控制系统中被广泛使用。

2.1 类型

2.1.1 按功率放大元件采用的级数分类。

(1) 一级放大: 由电机扩大机直接向消磁绕组供电。

(2) 两级放大: 由电机扩大机控制直流发电机的励磁, 再由直流发电机向消磁绕组供电。由于两级放大方式动态性能较差, 而且在闭环工作时容易产生振动, 故不推荐使用。

2.1.2 按电机扩大机与驱动电动机组成的形式分类。

(1) 共轴式: 电机扩大机与驱动电动机的电枢装在同一转轴和同一机壳内组成的机组, 为较小功率电机扩大机组, 如 ZKK3~ZKK12 型。

(2) 二机组和三机组: 较大功率电机扩大机, 如 ZKK25~ZKK500 型, 均将一台或两台电机扩大机与驱动电动机连同底板和联轴器组成二机组或三机组供应。对于航向绕组 XQ 和 YQ, 设计时一般规化到同一功率, 且在任意航向上两绕组的合成功率只相当于一个绕组的最大值, 故一般

采用三机组方式以减少体积、降低费用、提高效率。

2.2 控制方式

电机扩大机构成消磁电源均采用电流负反馈的闭环控制方式，以保证输出电流与给定信号成正比，并消除由于电网电压波动、绕组电阻变化等因素对输出电流的影响。

2.2.1 罗经式消磁系统中的控制方式

在电罗经式消磁系统中，输入信号来自导航系统，它包括经纬度、航行角等，经过电罗经式信号装置转换和解算，得到所需的给定电流。将给定电流与电机扩大机输出的消磁绕组电流通过合成装置进行比较，然后将差值送到调节器及驱动电路。调节器的作用是保证系统有足够的放大倍数，并满足系统动态跟踪及系统稳定的要求。驱动电路的作用是实现调节器与电机扩大机励磁绕组之间的功率匹配。电罗经式消磁系统的控制方式方框图见图 8.5-1。

2.2.2 在磁强计式消磁系统中的控制方式

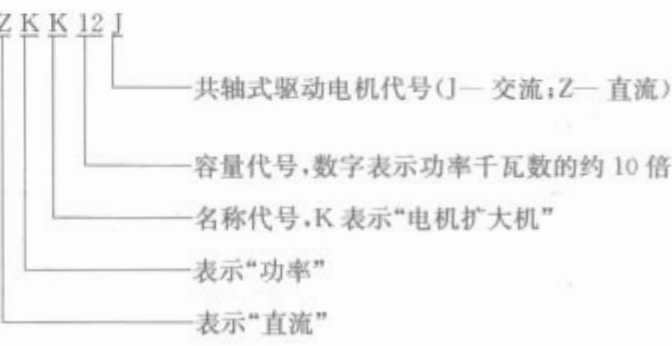
在磁强计式消磁系统中，输入信号是地球磁场。由安装在桅杆上的磁探测器接收地球磁场信号，经磁强计电路转换成电压信号，再经调节器及驱动电路调整与放大后供给电机扩大机作激励。将电机扩大机的输出通过分流器或其他类型的电流传感器获得电流反馈信号，然后将其送至磁探测器的反馈线圈，并在磁探测器内部产生一个与消磁绕组电流成正比的磁场与地球磁场相比较，由此实现电流负反馈的闭环控制方式，使绕组电流与地球磁场成正比。磁强计式消磁系统

的控制方式见图 8.5-2。

2.3 电机扩大机的主要技术数据

2.3.1 型号和控制绕组编号含义

型号示例：



控制绕组编号示例：



2.3.2 规格、参数

ZKK3-ZKK12、ZKK25-ZKK500 电机扩大机规格、参数见表 8.5-1、表 8.5-2。



图 8.5-1 电罗经式消磁系统的控制方式



图 8.5-2 磁强计式消磁系统的控制方式

表 8.5-1 ZKK3-ZKK12 共轴式电机扩大机规格、参数

型 号	电 机 扩 大 机				驱 动 电 动 机							
	输出 功率 (kW)	额定 电压 (V)	额定 电流 (A)	额定 转速 (r/min)	种类	输入 功率 (kW)	额定 电压 (V)	额定 电流 (A)	接法	功率 因数	起动电 流倍数	机组 效率
ZKK3J	0.14	80	1.75	2850	三相 异步 电动机	0.314	220/380	1.04/0.6	△/Y	0.78	7	0.445
	0.2	115	1.74			0.47		1.58/0.91		0.78		0.425
ZKK5J	0.37	85	4.35			0.74		2.5/1.45		0.78		0.500
	0.5	115				0.93		3.1/1.79		0.79		0.538
ZKK12J	1.0	115	8.7	2900		1.68		5.4/3.15		0.82		0.595
	1.2		10.43			1.9		6.03/3.5		0.83		0.630
ZKK3z	0.3	115	2.61	4500	直流 电动机	0.71	110	6.45	并励	—	—	0.422
ZKK5z	0.35	115	3.04	3000		0.7	220	3.18				0.500
	0.7		6.08	5000		1.3	110	11.8				0.538
						220	5.9					
	ZKK12z		1.0	115		8.7	4000	1.8				220
1.3		11.3	2.2			110		20				0.590
						220		10				
	1.5	230	6.52			2.57	220	11.7				

续表

型 号	控制绕组编号	控制绕组个数	K I			K II			K III			K IV		
			20℃时电阻 (Ω)	实际控制电流 (mA)	长期允许电流 (mA)	20℃时电阻 (Ω)	实际控制电流 (mA)	长期允许电流 (mA)	20℃时电阻 (Ω)	实际控制电流 (mA)	长期允许电流 (mA)	20℃时电阻 (Ω)	实际控制电流 (mA)	长期允许电流 (mA)
ZZK25	25-2-1	2	985	23	200	985	23	200	—	—	—	—	—	—
	25-2-2	2	1500	18	160	1500	18	160	—	—	—	—	—	—
	25-2-3	2	3310	12	110	3310	12	110	—	—	—	—	—	—
	25-2-4	2	5000	10	90	5000	10	90	—	—	—	—	—	—
	25-3-5	3	1065	29	150	1065	29	150	950	29	200	—	—	—
	25-4-6	4	37.2	150	720	18.5	230	1150	15.6	230	1150	18.5	230	1150
	25-4-7	4	340	58	230	18.5	230	1150	340	58	230	402	58	230
	25-4-8	4	1820	24	105	18.5	230	1150	1820	24	105	792	63	110
	25-4-9	4	21.7	190	950	1500	27	120	21.7	190	950	1500	27	120
	25-4-10	4	2920	15	85	131	150	250	2920	15	85	1000	50	100
	25-4-11	4	340	58	225	18.5	230	1150	15.6	230	1150	18.5	230	1150
	25-4-12	4	1835	22	100	2165	22	100	1835	22	100	2165	22	100
ZZK50	50-2-1	2	1000	22	200	1000	22	200	—	—	—	—	—	—
	50-2-2	2	1500	21	180	1500	21	180	—	—	—	—	—	—
	50-2-3	2	3920	12	110	3920	12	110	—	—	—	—	—	—
	50-4-4	4	24.8	195	975	9.15	340	1700	7.95	340	1700	9.15	340	1700
	50-4-5	4	2200	24	100	9.15	340	1700	2200	24	100	930	63	100
	50-4-6	4	3540	15	85	3540	15	85	4.16	750	2000	44.7	150	720
	50-4-7	4	1540	27	120	1770	27	120	1540	27	120	1770	27	120
	50-4-8	4	460	44	220	535	44	220	460	44	220	535	44	220
	50-4-9	4	1500	27	120	1000	33	165	1500	27	120	1000	33	165
	50-4-10	4	1500	27	120	300	60	300	1500	27	120	30	190	950
	50-4-11	4	410	58	210	21.6	230	1150	410	58	210	470	58	210
ZZK70	70-2-1	2	1000	22	220	1000	22	220	—	—	—	—	—	—
	70-2-2	2	1500	19	190	1500	19	190	—	—	—	—	—	—
	70-4-3	4	1950	22	120	800	38	180	1950	22	120	24	240	960
	70-2-4	2	5100	10	100	5100	10	100	—	—	—	—	—	—
	70-3-5	3	200	61	370	200	61	370	110	61	370	—	—	—
	70-3-6	3	200	61	370	200	61	370	94	120	480	—	—	—
ZZK100	100-2-1	2	1000	25	210	1000	25	100	—	—	—	—	—	—
	100-4-2	4	8.16	350	1600	37.2	175	800	8.16	350	1600	37.2	175	800
	100-4-3	4	8.16	350	1600	2100	27	100	8.16	350	1600	2100	27	100
	100-4-4	4	8.16	350	1600	37.2	175	800	37.2	175	800	37.2	175	800
	100-2-5	2	1415	20	200	1415	20	200	—	—	—	—	—	—
	100-2-6	2	4750	11	110	4750	11	110	—	—	—	—	—	—
	100-4-7	4	24	200	1000	9.5	350	1600	8.16	350	1600	9.5	350	1600
	100-4-8	4	26.6	230	850	73	110	550	0.102	2850	14 000	13.6	400	1000
	100-4-9	4	2190	27	90	2100	27	100	8.16	350	1600	2100	27	100
	100-4-10	4	38.5	160	740	2090	30	90	38.5	160	740	2090	30	90
	100-3-11	3	39.5	98	500	1050	32	160	1050	32	160	—	—	—
	100-4-12	4	500	52	210	500	50	220	500	52	210	500	50	220
ZZK110	110-4-1	4	4.9	400	2000	22.4	200	1000	19.6	200	1000	22.4	200	1000
	110-4-2	4	317	54	270	362	54	270	317	54	270	362	54	270
	110-4-3	4	4.9	400	2000	5.6	400	2000	4.9	400	2000	22.4	200	1000
	110-4-4	4	4.9	400	2000	2200	24	120	4.9	400	2000	2200	24	120
	110-4-5	4	4.9	400	2000	5.6	400	2000	317	54	270	5.6	400	2000
	110-2-6	4	150	58	580	150	58	580	—	—	—	—	—	—
	110-4-7	4	165	70	350	3.9	460	2300	165	70	350	150	92	460

续表

型 号	控制绕组编号	控制绕组个数	K I			K II			K III			K IV		
			20℃时电阻(Ω)	实际控制电流(mA)	长期允许电流(mA)	20℃时电阻(Ω)	实际控制电流(mA)	长期允许电流(mA)	20℃时电阻(Ω)	实际控制电流(mA)	长期允许电流(mA)	20℃时电阻(Ω)	实际控制电流(mA)	长期允许电流(mA)
ZKK200	200-4-1	4	8.16	400	2000	2000	28	140	8.16	400	2000	2000	28	140
	200-4-2	4	8.16	400	2000	25	2000	1000	8.16	400	2000	25	200	1000
	200-2-3	2	825	25	150	825	25	150	—	—	—	—	—	—
	200-2-4	2	1000	25	150	1000	25	150	—	—	—	—	—	—
	200-3-5	3	500	50	250	500	50	250	1000	150	—	—	—	—
ZKK250	250-3-1	3	43	121	846	1070	27	188	1050	140	—	—	—	—
	250-3-2	3	400	34	238	400	34	238	1000	238	—	—	—	—
ZKK330	330-4-1	4	500	42.5	212	500	42.5	212	1000	200	1000	46	46	1000
ZKK500	500-4-1	4	10.3	326	1630	10.3	326	1630	2.9	3260	2.9	652	652	3260

注 本节数据源自湘潭电机厂产品资料。

2.4 电机扩大机组的连接方式、接口参数及维护使用要求

(1) 以 ZKK100 型电机扩大机与 Y-J2-160M2-2 型交流电动机组成电机扩大机组为例, 电机扩大机组的连接方式见图 8.5-3。接口参数如下:

- (2) 驱动电机的输入电源为 380V, 50Hz。
- (3) 控制绕组输入信号范围是 0~±30V。
- (4) 扩大机输出参数为 220V, 40A。

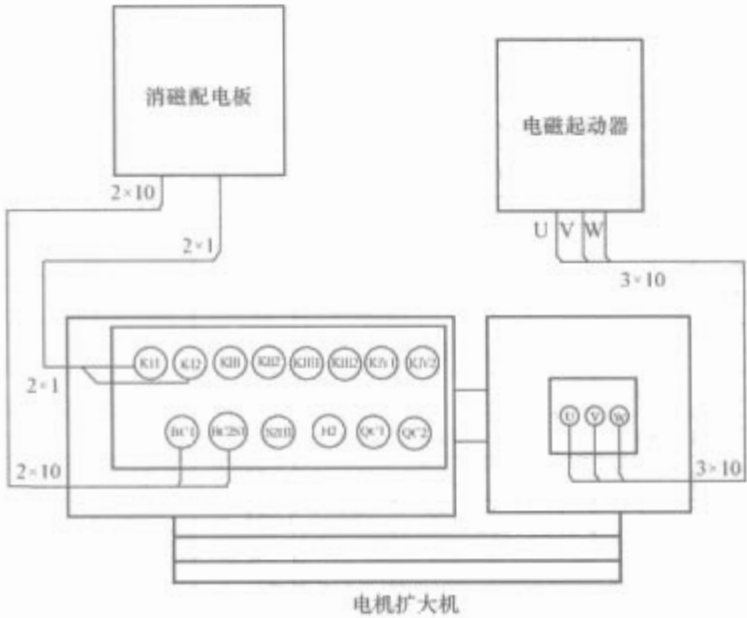


图 8.5-3 电机扩大机组连接图

(5) 维护操作要求。

- 1) 使用前用 500MΩ 绝缘电阻表测量电机各绕组对机壳和各绕组相互间的冷态绝缘电阻, 其数值不得低于 20MΩ。
- 2) 电机扩大机在空载无励磁的情况下, 将电动机瞬时启动后立即切断电源, 检查电机扩大机的旋转方向须与规定的旋转方向相符。
- 3) 定期检查电刷的磨损程度, 电刷的剩余高度若低于原有高度的 2/3, 则须更换结构型号相同的电刷。对新更换的电刷必须预先研磨成圆弧面。
- 4) 经常注意电机的响声、振动和轴承的发热情况, 如有异常则应更换轴承及轴承润滑脂。

3 静止式消磁电源

3.1 静止式消磁电源的分类

静止式消磁电源的分类如图 8.5-4 所示。

目前投入运用的静止式电源均是工频隔离方式, 高频隔离方式的静止式电源尚处于样机鉴定阶段 (称为模块式消磁电源)。

3.2 晶闸管消磁电源

3.2.1 主电路拓扑

晶闸管消磁电源主电路原理图如图 8.5-5 所示。



3.2.2 工作原理

(1) 在晶闸管消磁电源系统中, 输入端采用 Δ/Y 型变压器进行电气隔离, 变压器一次侧接成三角形, 可以消除 3 的整数倍的高次谐波。

(2) 整流电路采用三相桥式反并联电路, A 组桥输出正相消磁电流, B 组输出负相消磁电流。

3.2.3 应用现状

(1) 晶闸管消磁电源作为我国第一代静止式消磁电源曾成功地应用于水面舰船上, 有效地克服了旋转电机式消磁电源精度低、效率低、噪声大、动态性能差的缺点。

(2) 晶闸管电源采用相控调压原理, 直接对工频正弦波的导通角进行控制, 对电网污染大, 而且对低频进行滤波在效果和部件体积上的矛盾非常尖锐, 因此对新一代电子装备复杂、有电磁兼容要求的舰船来说, 晶闸管电源已经无法达到要求。

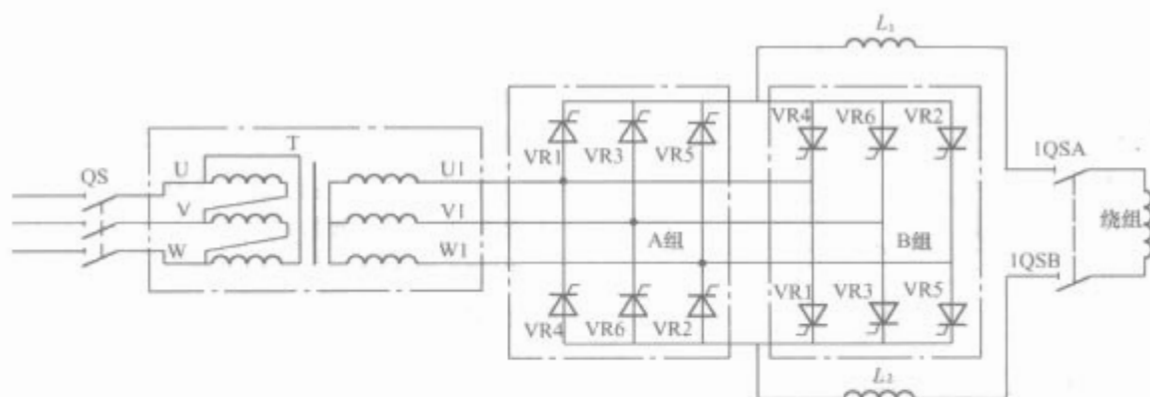


图 8.5-5 晶闸管消磁电源主电路原理图

3.3 脉宽调制式消磁电源

3.3.1 主电路框图

脉宽调制式消磁电源主电路原理框图如图 8.5-6 所示。



图 8.5-6 脉宽调制式消磁电源主电路原理框图

脉宽调制式消磁电源主电路分为 AC/DC 变换电路和 DC/DC 变换电路两部分，下面分别予以描述。

3.3.2 AC/DC 变换电路

AC/DC 变换电路的作用是将三相 AC 380V 的交流电源转换为 DC 540V 的直流电源，在已定型的脉宽调制式消磁

电源中，均采用“隔离变压器+不控整流”的电路拓扑，根据整流相数的不同，又分为三相六脉波整流和六相十二脉波整流两种方式。

3.3.2.1 六脉波整流电路

三相六脉波整流电路原理图如图 8.5-7 所示。

输入隔离变压器与可控硅消磁电源一样，一次侧接成三角形，以消除 3 的整数倍的高次谐波。全桥电路将三相交流电整流成脉动的直流电，每周共有六个脉波，故称六脉波整流电路。电感 L_1 和电容 C_1 构成滤波电路，滤除脉动的直流电中的交流分量，将平直的直流电压提供给后级负载。

不控整流电路与相控整流电路相比，由于没有调相角的问题，对电网的谐波污染明显减小。

3.3.2.2 十二脉波整流电路

六相十二脉波整流电路原理图如图 8.5-8 所示。

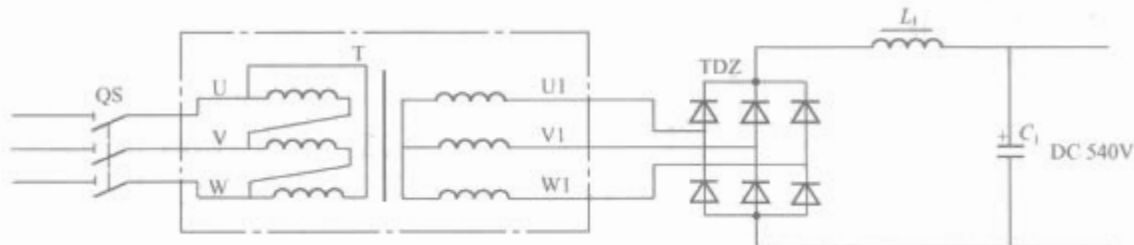


图 8.5-7 三相六脉波整流电路原理图

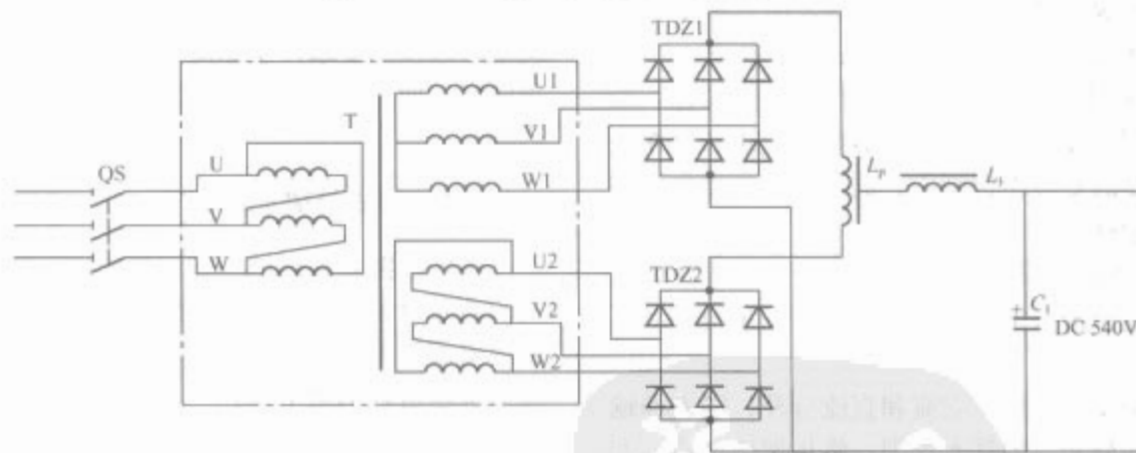


图 8.5-8 六相十二脉波整流电路原理图

输入隔离变压器一次侧接成三角形，以消除 3 的整数倍的高次谐波，二次侧三相绕组每相各有两个绕组，U1、U2、V1、V2、W1、W2。U1、V1、W1 三个绕组接成星形，U2、V2、W2 三个绕组接成三角形。令二次侧三角形绕组的每相匝数 N_2 比二次侧星形绕组的每相匝数 N_1 多 $\sqrt{3}$ 倍，则二次侧两组绕组的线电压数值相等。

由于三相电源星形联结时，线电压超前相应的相电压 30° ，所以两个三相桥 TDZ1、TDZ2 的三相输入电压对应相差 30° 相角，经平衡电抗器并联输出时可以获得一个十二脉波的整流电压，且任何时刻两个三相桥同时对负载供电，每个三相桥输出 $1/2$ 的负载电流。

十二脉波整流电路与六脉波整流电路相比，整流输出电压脉波数增加了一倍，将最低阶次为 5、7 次的谐波提高到 11、13 次，谐波幅值降低，整流特性变好，大大减轻了整流装置谐波对电网的污染。

3.3.3 DC/DC 变换电路

3.3.3.1 主电路拓扑

DC/DC 变换电路的主电路原理图如图 8.5-9 所示。

3.3.3.2 主要控制方式及工作原理

(1) 在各种脉宽调制式消磁电源中，主要采取了单极性调制、单极倍频调制和双极性调制三种控制方式。

(2) 脉宽调制式消磁电源的工作原理是，根据给定电流

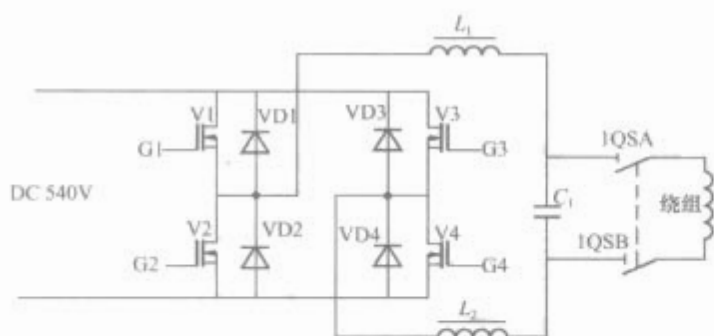


图 8.5-9 DC/DC 变换电路原理图

和反馈电流的 PI 调节运算结果，在 H 桥的两桥臂中点之间产生脉冲宽度可变的高频方波电压，经电感 L_1/L_2 和电容 C_1 组成的滤波电路滤波后将符合给定电流大小、极性要求的电流提供给消磁绕组。

(3) 对于单极性调制，给定电流为正时，只有 V1、V4 导通，在 H 桥两桥臂中点之间只有正脉波；给定电流为负时，只有 V2、V3 导通，在 H 桥两桥臂中点之间只有负脉波。

(4) 对于单极倍频调制，与单极性调制一样，H 桥输出只有正脉波或负脉波，但在一个周期中各时间段过渡时仅一个开关器件改变开关状态，因此与单极性调制相比，开关频率相同时，H 桥输出电压的脉波数提高了一倍，这对减少开关损耗或降低输出电压纹波都是有益的。

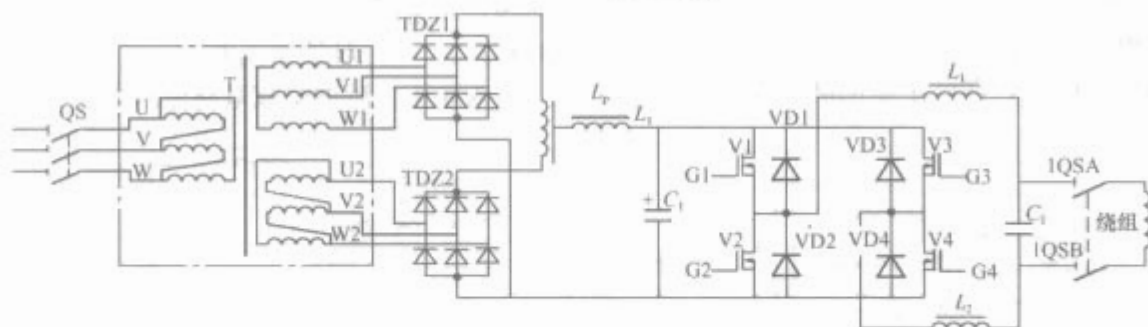


图 8.5-10 75A/400V 静止式消磁电源主电路原理图

(1) 该型消磁电源的 AC/DC 变换电路采用六相十二脉波整流电路，DC/DC 变换电路采用典型的 H 桥电路。

(2) H 桥电路选用性能优越的 IGBT 作为开关器件，控制方式为双极性调制。性能优越的开关器件的应用和旨在提高电源输出电压品质的双极性调制方式的采用使该型电源具有较好的电气性能指标。

(3) DC/DC 变换电路采用模块化设计，大大减少调试和试验的工作量，便于进行出厂温度试验，提高了设备的可靠性和可维性。

(4) 柜架的结构设计按照“交流和直流分开、输入和输出分开、高频和低频分开”的基本原则，将柜架按前后、左右、上下分成若干个隔离的封闭空间，通风口采用专门设计的蜂窝状波导管隔离，再加上输入、输出滤波器的加装以及六相十二脉波整流电路的应用，这些措施大大提高了消磁电源的电磁兼容性。

4 特种消磁电源

传统的消磁绕组供电方式是一路消磁电源对应一个绕组。绕组各个区段是串联的，其安匝数的调整只能通过在线盒里调匝数来实现。随着模块化的开关式消磁电源的出现，产生了各区段独立供电的方式。这种方式可以通过调电流实现安匝数的无级调整。其优点除了可以提高调整精度和缩短调整过程之外，还可以通过电叠加方式将感应、固定及涡流几种补偿量合成后输出到消磁绕组。因为各区段独立供

(5) 双极性调制与以上两种调制方式不同，不管给定电流为正或为负，H 桥输出电压中既有正脉波，又有负脉波。双极性调制与单极性调制和单极倍频调制相比，输出电压品质有较大改善，特别是给定电流过零点时能够做到平滑过渡，但降低了母线直流电压利用率。

3.3.3.3 开关器件的选择

(1) 根据消磁电源功率、电流电压等级的不同，结合各个时期的技术发展水平，在已定型的脉宽调制式消磁电源中，主要采用了 MOSFET、GTR、IGBT 等开关器件。

(2) MOSFET 主要用于小功率和电流电压等级较低的场合，GTR、IGBT 主要用于大功率和电流电压等级较高的场合。其中 GTR 作为功率器件发展的一个阶段性产物，已逐渐被性能更加优越的 IGBT 所取代。

3.4 应用现状

脉宽调制式消磁电源是我国第二代静止式消磁电源，与第一代静止式消磁电源相比，有了明显的技术进步。通过高频开关电源技术的成功应用，与晶闸管电源相比，大大减小了对电网的污染，提高了输出电压的品质，是目前用的最多且技术已完全成熟的消磁电源主导产品。

图 8.5-10 是一种 75A/400V 静止式消磁电源的主电路原理图。

电，感应、固定及涡流的补偿量也可以独立调整，因而一个绕组可以按照要求产生感应、固定及涡流各自不同的补偿磁场曲线；而对于传统的串联方式，一个绕组只能补偿一种磁场。

4.1 多通道式消磁电源

各区段独立供电的方式，最先用于低磁化反水雷舰艇专用的消磁设备。由于各区段要求的功率较小，模块化的消磁电源采用插件式集中安装到一个机架，并安装在一个舱室，称为多通道式消磁电源。

4.1.1 控制方式

多通道式消磁电源采用磁强计控制方式。模块化消磁电源的输入端并联，同步接受来自磁强计式信号装置送来的电压信号，经过电气隔离后，按设定的传递函数进行转换和调整，然后经过功率放大分别将电流输送到相应的消磁绕组区段。其框图见图 8.5-11。

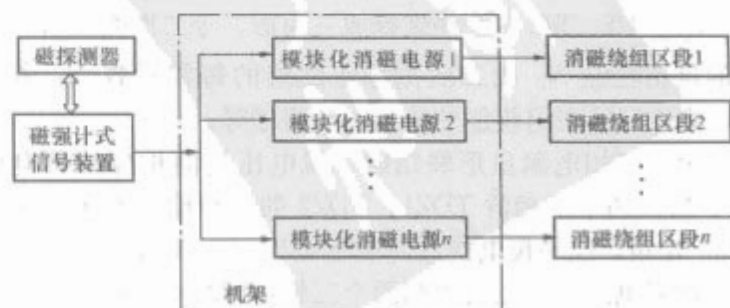


图 8.5-11 多通道式消磁电源控制方式

其中模块化消磁电源的原理框图见图 8.5-12，面板布置图见图 8.5-13。

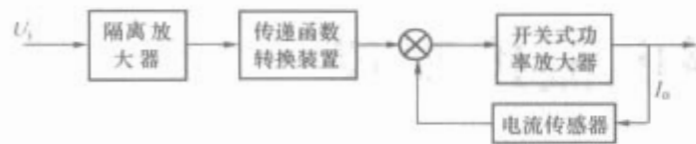


图 8.5-12 模块化消磁电源原理框图

4.1.2 传递函数转换装置

传递函数转换装置用于感应、固定以及涡流补偿量的叠加及调整。其传递函数为

$$F(s) = K_i V_i + \frac{-K_e \Delta}{1 + T \Delta} V_i \pm V_P \quad (8.5-2)$$

式中：\$V_i\$ 为输入信号；\$K_i\$ 为绕组调整时设定的感应补偿增益系数；\$K_e\$ 为绕组调整时设定的涡流补偿增益系数；\$\Delta\$ 为拉普拉斯算子；\$T\$ 为时间常数；\$V_P\$ 为绕组调整时设定的固定补偿量。

4.1.3 技术规格

(1) 供电电源：380V、50Hz。

(2) 额定输出：±5A，24V；±10A，40V。

(3) 功率放大器操作说明（以感应与固定叠加的模块化消磁电源插件为例）：

1) 报警指示灯（红色），当输出电流与要求的输出电流相差太大时，该指示灯亮。



图 8.5-13 模块化消磁电源面板布置图

2) 电源指示灯（绿色），当插件处于正常运行状态时，该指示灯亮。

3) 工况选择开关，当位于“感应”“固定”位置时，分别调节相应的电位器，可调整该通道（插件）的感应量和固定量，调整后，置于“叠加”位置，则该通道的输出为感应量和固定量之和。

4) 为固定量调整电位器，处于正中位置时，固定量为 0；两侧分别为负补偿或正补偿。

5) 感应增益调整电位器，处于左侧时增益为 0，处于右侧时增益为最大。

6) 工作开关，正常工作时应位于“运行”位置，当需拔或插通道前，应置于“停止”位置后再拔或插。

4.2 分布式消磁电源

各区段独立供电的方式用于普通钢壳船时，一般采用分布式消磁电源。分布式消磁电源为模块化的大功率开关电源，它就近安装在所需供电的绕组区段附近，并通过数据总线与信号装置相连。分布式电源优点是：提高系统的灵活性、可靠性，降低系统的电力损耗，并且不需要很大的舱室，减少电源的种类，便于标准化和系列化。

4.2.1 控制方式

分布式消磁电源控制方式可采用磁强计控制方式或地磁模式组解算控制方式，也可采用复合控制方式或闭环控制方式。复合控制方式框图见图 8.5-14。

4.2.2 技术规格

(1) 供电电源：380V、50Hz。

(2) 额定输出功率：3kW、5kW、8kW。

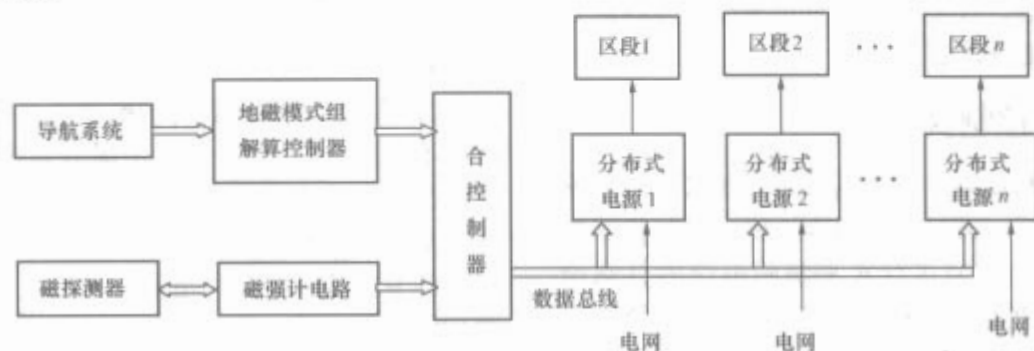


图 8.5-14 复合控制方式的分布式消磁电源

第6章 船舶消磁电流控制仪

1 船舶消磁控制设备类型

消磁电流控制仪是船舶消磁系统中的重要组成部分,它根据作用在船舶上的地球磁场,实时地向消磁电源提供消磁电流控制信号、显示消磁绕组中的电流和消磁系统工作状态,并进行不同工况转换。

按照获取地球磁场的方式,消磁系统控制设备可以分为罗经式消磁电流控制仪器、磁强计式消磁电流控制仪器和地磁解算式消磁电流控制仪器。由于采用的元器件和控制原理及控制功能的不同,每类仪器中又形成了不同的系列。仪器型号表示方法如图 8.6-1 所示。

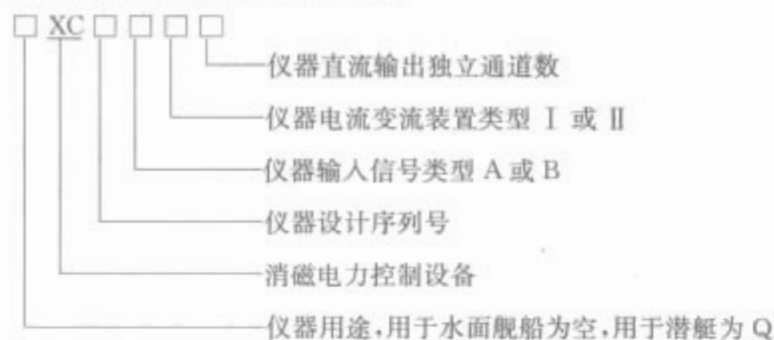


图 8.6-1 消磁电流控制仪型号表示方法

其中消磁电流变流装置为 I 或 II 分别指所控制的消磁电源为旋转电源或静止电源。A 型输入信号指罗经信号或综合导航信号, B 型信号指磁强计信号。

2 罗经式消磁电流控制仪

罗经式消磁电流控制仪以“查阅地磁图”方式获取地球磁场,在不同的纬度地区,通过查阅相应地磁场进行仪器的比例系数设定,根据航向信号进行水平消磁电流的自动调整。由于只具有半自动功能,根据航向变化进行水平消磁电流自动调整,纬度的调整靠手动调整完成,对船舶的倾斜和摇摆等引起的磁场变化无法进行消磁电流调整,所以现代舰船上几乎不再使用该类控制仪器。

3 磁强计式消磁电流控制仪器

磁强计式消磁电流控制仪器利用安装于桅杆的三分量磁强计,实时测量地球磁场的分量作为消磁电流控制信号,当船舶的纬度、航向和姿态发生变化,它均能检测到地磁场的变化,实现对消磁电流的自动调整,是自动化程度较高的消磁电流控制仪器。缺点是磁传感器测量的信号中除了地磁场外,还包括了船舶的一些干扰磁场。当应用到钢铁船舶上时,需要进行抗干扰调整。

3.1 仪器组成

控制仪器由三分量磁探测器和消磁电流自动控制仪组成。

3.2 仪器工作原理

3.2.1 仪器的原理框图

(1) 将频率为 f 的交流电所激励的铁心线圈放在恒定磁

场中,并使铁心线圈的轴线与磁场方向一致,则由于铁心的 $B-H$ 曲线的非线性,交流电压(或电流)受到恒定磁场的调制,从而产生偶次谐波成分。在偶次谐波中,二次谐波电压幅值随外磁场强度增加而增加,其相位则随外磁场 H_e 反向而反相,间接测量外界磁场。

(2) 磁强计式消磁电流控制仪器就是根据上述原理设计的,如图 8.6-2 所示,测量部件称作磁探测器,它由三个磁探头组成,一个沿船舶首尾方向放置,称作 X 探头,一个沿船舶横向放置,称作 Y 探头,一个沿船舶垂直方向放置,称作 Z 探头。

1) X 探头能够测出地磁场的纵向分量,经 X 分量电路的变换与放大,控制纵向水平绕组或纵向肋骨绕组中的电流自动变化。

2) Y 探头能够测出地磁场的横向分量,经 Y 分量电路的变换与放大,控制横向绕组中电流的大小和方向。

3) Z 探头能够测出地磁场的垂向分量,经 Z 分量电路的变换与放大,控制垂向绕组中电流的大小和方向。

4) 从图 8.6-2 中看出,控制仪器是由结构相同的三部分组成,可以分为三个单分量部分(X、Y、Z),各单分量系统的原理、结构、线路都是完全一样,只是相关的参数存在差异,可以分析一个单分量系统。

3.2.2 单分量系统工作原理

图 8.6-3 为仪器的单分量工作原理框图,振荡器产生 4000Hz 的正弦波振荡,它一方面为磁探头提供励磁电流,另一方面经移相放大后为相敏整流器提供参考电压,滤波器的中心频率为 8000Hz,用于提取磁探头中的二次谐波,阻止基波或其他高次谐波通过,该二次谐波电压经交流放大器进行放大,供相敏整流器作信号电压。相敏整流器将交流信号电压变换成直流信号电压,并且直流信号的大小随交变信号的幅值而变化。而直流信号的极性随着交流信号电压的相位而变化。相敏整流器输出的直流电压经直流放大器进行放大,以便给电机扩大机控制绕组电流,使电机扩大机输出一定大小和方向的电流,供给消磁绕组。

当地磁场分量为零时,消磁绕组中的电流为零,当地磁场分量增加时,消磁绕组中的电流将相应增大。而当地磁场分量方向改变时,二次谐波电压的相位将随着反相,由于相敏整流器的相敏作用,其输出直流电压极性反向,因而绕组中的电流将反向。

为了提高系统的性能,系统中设置了反馈线路,经分流器和反馈调整器将信号送到探头中去,构成闭环系统,因此仪器的单分量是一个采用电流负反馈的闭环系统。

3.2.3 各部件工作原理

3.2.3.1 振荡电路

仪器的振荡电路由 LC 振荡器和推挽功率放大器组成,振荡频率为 4000Hz,作为磁探头的励磁电源,并经移相放大后作为相敏整流电路的参考电压,振荡电路的原理如图 8.6-4 所示。

振荡器采用常用的 LC 振荡器,振荡频率取决于振荡电路变压器 T1 原边线圈的电感 L 和电容器 C_1 的参数。即谐

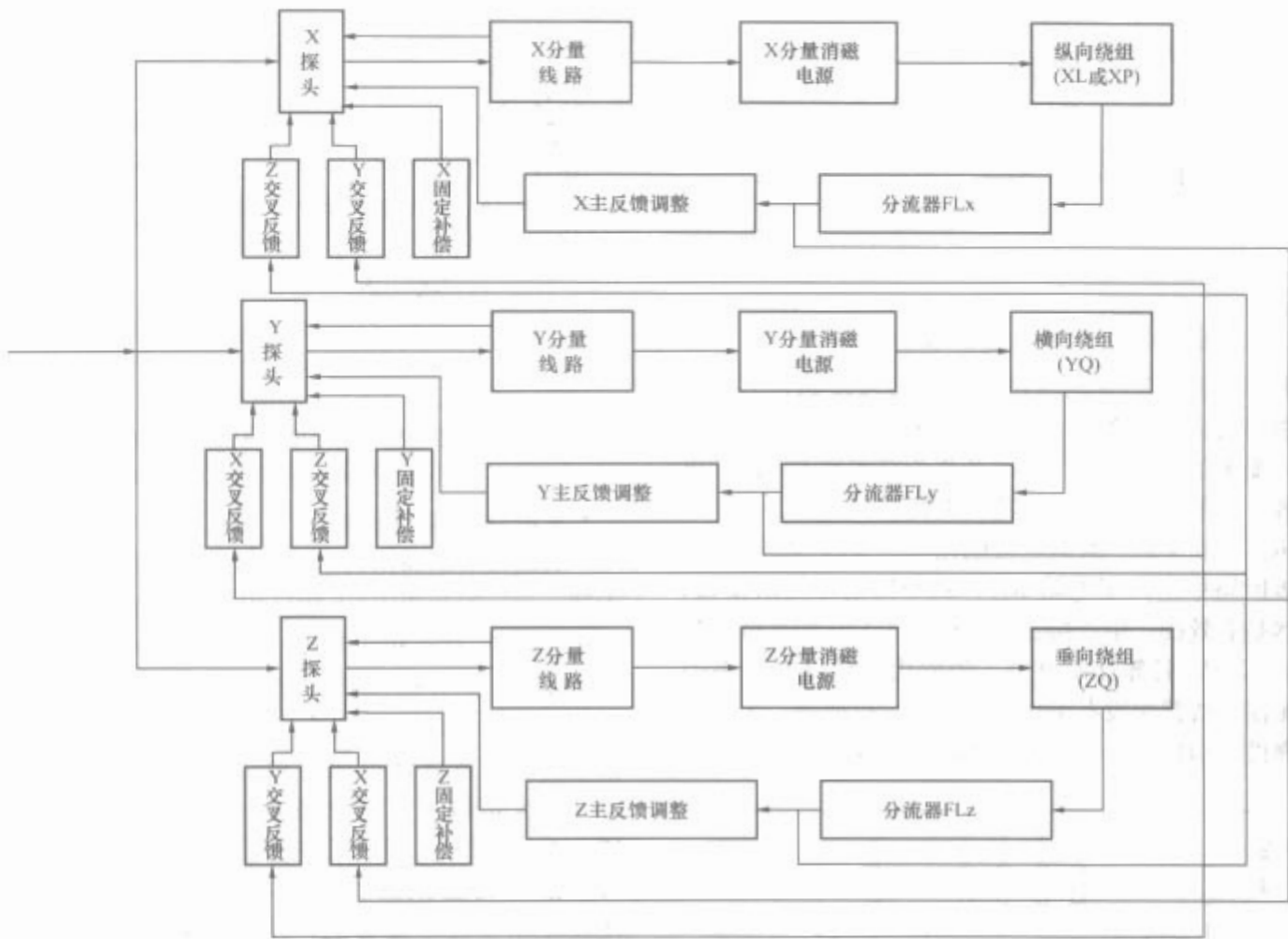


图 8.6-2 磁强计式控制方式消磁系统原理框图

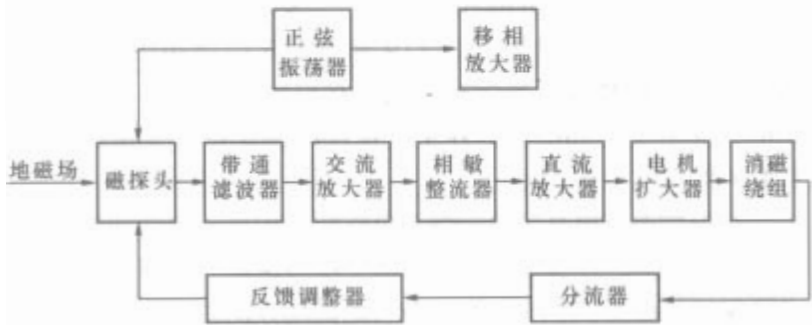


图 8.6-3 单分量系统原理框图

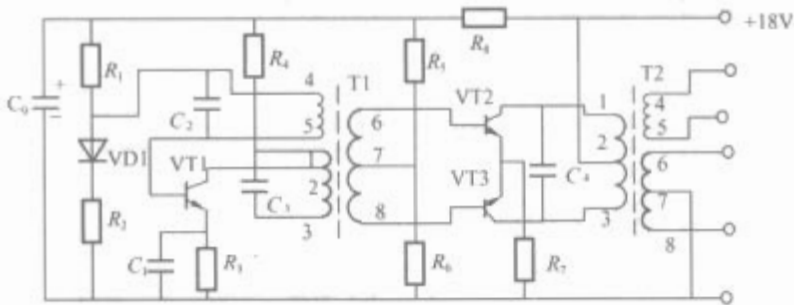


图 8.6-4 振荡电路原理图

振频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，并已确定 f_0 ，谐振槽路的特征阻抗为 $P_z = \sqrt{L/C_1}$ ，振荡时电路的电感为 $L = 1/(2\pi f_0)^2 C_1$ ，由于激励磁探头需要具有一定的激励功率，而一般振荡器的输出功率不宜设计得太大，因此在仪器中采用 VT2、VT3 和 B2 等组成推挽功率放大器，将信号放大后再激励磁探头。

3.2.3.2 移相放大电路

在测量绕组得到并经磁调制的二次谐波信号，需要经过交流电压放大后再进行相敏整流，由于线路中存在相移，需调整输入信号与参考电压的相位，该相位调节电路是由变压

器 T2 和电容 C_5 、电位器 RP2 组成的阻容桥式移相器，其原理图如图 8.6-5 所示，在仪器中，依赖调节电位器 RP2 来改变相位，其变化范围为 $30^\circ \sim 170^\circ$ 左右。为了获得较大的移相电压，移相后的电压必须经过交流电压放大，其电压有效值必须满足大于相敏整流电路输入信号的有效值，并具有一定的功率输出。

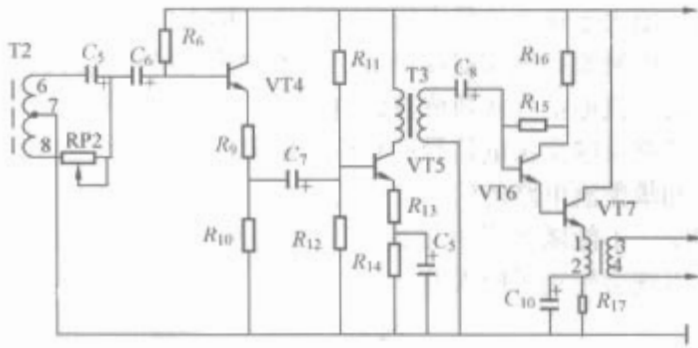


图 8.6-5 移相放大电路原理图

3.2.3.3 带通滤波器

带通滤波器用于取出与地磁强度成正比的二次谐波电压。带通滤波器原理如图 8.6-6 所示，其串臂和并臂分别组成串联和并联谐振回路，串臂和并臂的谐振频率均为 ω_0 ， $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ 。串臂在 ω_0 附近呈现低阻抗，而对于其他频率的信号呈现高阻抗，并臂在 ω_0 附近呈现高阻抗，而对于其他频率的信号呈现低阻抗。这样就构成了只允许二次谐波信号通过，而对于其他各偶次谐波具有很大衰减的带通滤波。

3.2.3.4 交流放大电路

交流放大电路将滤波器输出的交流电信号进行放大。原理如图 8.6-7 所示，是由三极 NPN 硅三极管直接耦合组成，为了获得足够的稳定度，线路采用了负反馈。由 VT11 集电

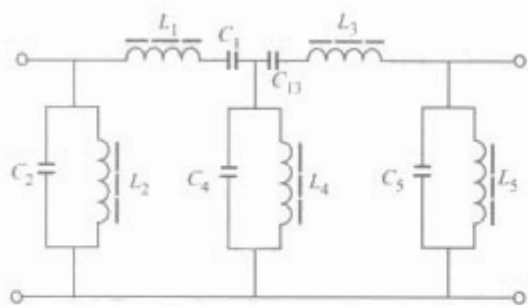


图 8.6-6 带通滤波器原理图

极经电阻 R_{26} 反馈到 VT9 的基极。负反馈可以稳定由于温度变化而引起的直流工作点漂移，并且维持增益的恒定。改变输入级可变电位器 RP4，可以改变整个交流放大电路的电压放大倍数，一般可在 50~300 范围内调节。初始工作点是通过调节 R_{22} ，使 VT11 的集电极电位 11~14V 来整定的。由于在基极回路中串入了电阻 R_{21} ，故即使电源内阻很低，负反馈仍然是有效的。用连接在硅三极管 VT10 的基极与集电极间的 C_{21} 、 R_{20} 局部反馈电路，消除由于深度负反馈引起的高频振荡。线路中没有采用电解电容，以便进一步提高线路的可靠性。输出级采用射级跟随器，以改善输出性能。

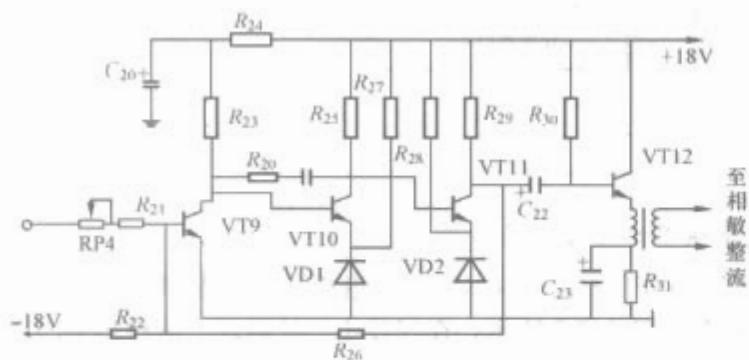


图 8.6-7 交流放大电路

3.2.3.5 相敏整流电路

相敏整流电路如图 8.6-8 所示，电路中，必须使参考电压有效值大于输入信号电压的有效值，输入信号的频率与参考电压的频率必须相同或倍频。相敏整流电路将交放大电路输出的交流电信号转换成直流电信号，直流电信号的极性和大小能够反映交流电信号的相位和幅值。因此，在系统调制后，相敏整流电路的信号电压的相位与参考电压的相位应保持稳定，不能随外界温度的变化或电网电压波动而产生变化，否则会影响系统误差。

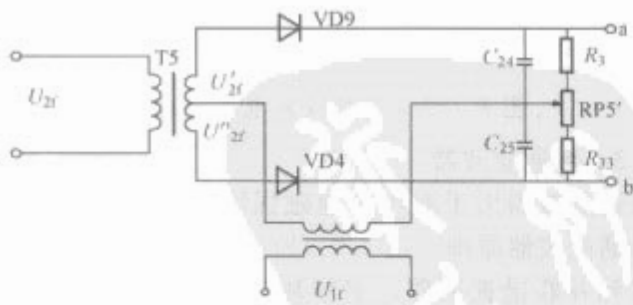


图 8.6-8 相敏整流电路原理

由图 8.6-15 (a) 所知，输出电压为 $U_{ab} = U_{1f} + U_{2f} - (U_{1f} - U_{2f}) = 2U_{2f}$ ，正比于信号电压，当信号电压反相时，输出电压的极性也随之发生变化。当信号电压等于零时，输出电压为零，当信号电压和参考电压同相时，输出电压也等于零。其波形如图 8.6-9 (b)，从波形图可以看出，当外磁场不等于零时，但是 U_{1f} 和 U_{2f} 之间的相位差为零时，信号电压与参考电压叠加后的波形是对称的，所以相敏整流的输出仍为零。

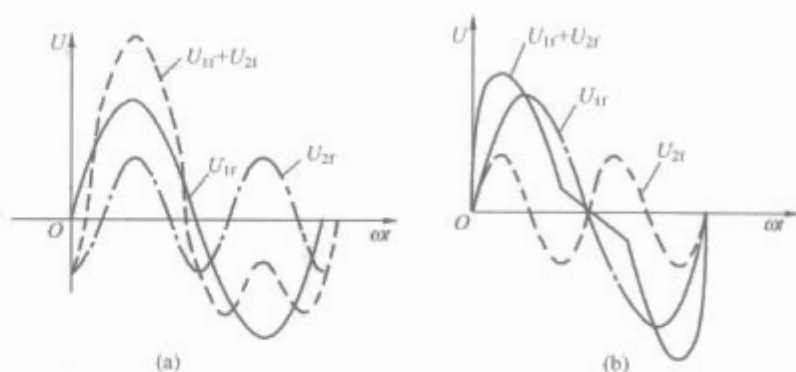


图 8.6-9 相敏整流电路波形

(a) 参考电压与信号电压相位差 90° 叠加后的波形；
(b) 信号电压与参考电压无相移叠加

3.2.3.6 直流放大电路

直流放大电路由两组运算放大器组成，一组构成直流放大器，另一组构成 1:1 的反相器，这样仪器不仅可以控制电机扩大机-直流发电机组，而且可以和静止电源配套使用，该放大器的结构框图如图 8.6-10 所示，放大倍数为 51 倍左右。调节反馈电阻可以改变放大倍数，它的电路如图 8.6-11 所示，其中组成差分的晶体管必须进行挑选，使其特性参数尽量靠近，而末级输出 VT18 与 VT19 也应选配特性参数较接近的三极管，否则会引起正负输出的对称性变差。通常晶体管 VT19 和 VT25 应选用 PNP 硅管为佳。直流运算放大器调整应满足在单独调整或接入系统工作时，使放大器和倒相器在全工作区间都能稳定工作。

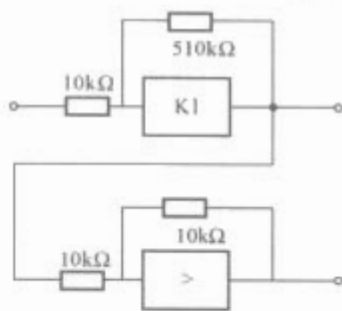


图 8.6-10 直流放大器结构框图

3.2.3.7 主反馈电路

主反馈电流取自与消磁绕组串联的专用分流器的两端，通过主反馈回路送入本分量磁探头的主反馈绕组，反馈电流方向必须保证其在铁心中产生的磁场与地磁场方向相反，即系统工作在负反馈状态。为了使得消磁绕组电流稳定地跟踪地球磁场并且成比例变化，要求采用深度负反馈。通常消磁绕组电流值是通过电位器调节，在主反馈电路中还接有热敏电阻，用来补偿环境温度变化引起的主反馈线圈中电阻的变化。

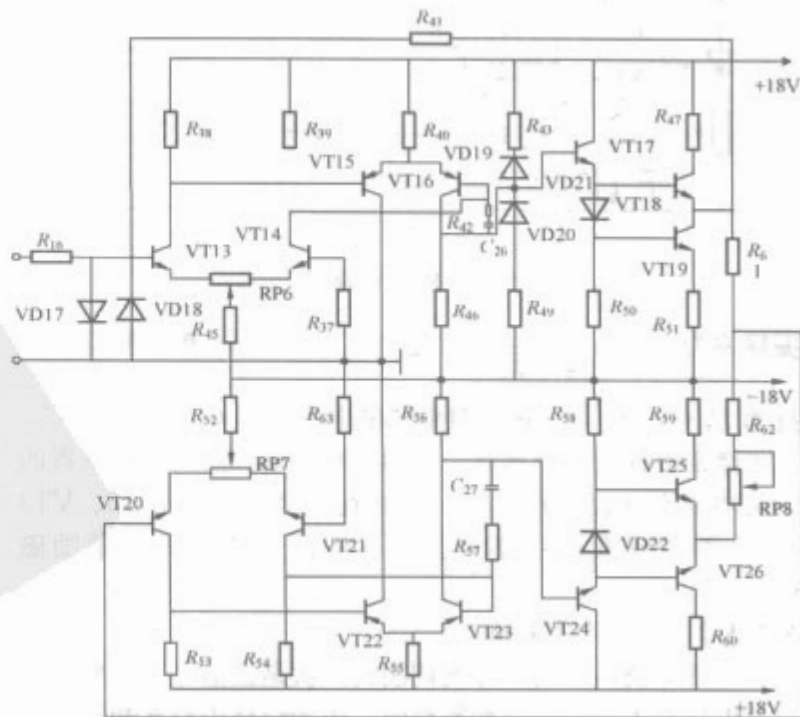


图 8.6-11 直流放大器电路

3.2.3.8 交叉反馈电路

交叉反馈电路的作用是消除由于其他分量的影响在本分量探头铁心中产生的干扰磁场。例如在 X 分量探头铁心中,除了地磁场纵向水平分量和舰艇纵向感应磁化的纵向感应磁场(X_{ix})及纵向水平绕组(或纵向肋骨绕组)电流产生的磁场以外,还存在由于舰艇横向感应磁化、垂直感应磁化的磁场(X_{iy}, X_{iz}),以及横向绕组电流、垂向绕组电流产生的磁场干扰,这些分量统称为 X 分量铁心中的干扰量,为了确保绕组电流与地磁场成比例变化,必须把这些干扰量消除。交叉反馈电路的作用就是为了补偿这些干扰量,为此在 X 分量探头中设置了两条交叉反馈电路,一条连到 Y 分量消磁绕组分流器的两端,用来消除 X_{iy} 和横向绕组通电的影响,另外一条连到 Z 分量消磁绕组分流器的两端,用来消除 X_{iz} 和垂向绕组通电的影响。调整时利用双向开关来选反馈电流的方向,使得探头铁心中产生的磁场与干扰磁场方向相反,通过调节相应的电位器调节线圈中的电流,使干扰磁场恰好被补偿。

3.2.3.9 固定补偿电路

固定补偿电路主要用于补偿船舶的固定磁化及各种固定绕组在探头处引起的干扰。由于这些磁场在一定条件下是相对不变的,所以就将固定补偿电路接到一个直流电源上,以便向探头的补偿绕组提供适当的电流,达到补偿这类干扰磁场的目的。

3.2.3.10 直流稳压电源电路

直流稳压电源电路向三个分量的各部分电路提供恒定的直流电源,如图 8.6-12 所示,其中的 LC 元件起滤波作用,滤除交流成分,减小直流电压的脉动。

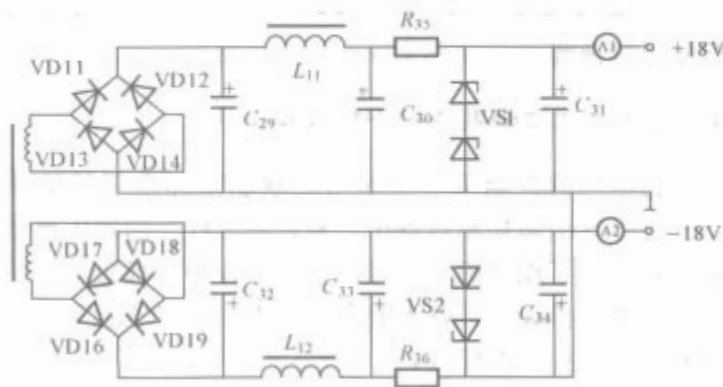


图 8.6-12 直流稳压电源电路

3.2.4 结构

仪器的 X 、 Y 、 Z 三个分量插件在结构上完全相同,统称为单分量插件。在每单分量插件骨架的两侧分别安装交流放大和直流放大的印制电路板。这两块板在习惯上又称为交放板和直放板。

交放板上包括振荡器、移相器、滤波器、交流放大器和相敏整流器。直放板上只安装有直流放大器部分。为了便于观察,直流放大器的输出电压表安装在插件面板上。单分量插件通过导轨插入仪器的箱内,经两副 14 芯(AT-14)的插头插座与系统连接,并用弹簧卡销紧固插件。

3.3 磁探头工作原理

3.3.1 磁探头原理

磁探测器由三个互相垂直放置的磁探头组成,其中 X 探头检测沿船舶纵向作用的地磁分量 H_{dx} , Y 探头检测沿船舶横向作用的地磁分量 H_{dy} , Z 探头检测沿船舶垂向作用的地磁场 Z_d ,每一个探头都是由两条铁心和六个绕组组成,结构如图 8.6-13 所示。磁探头的作用是把微弱的恒定的或者缓慢变化的磁场调制成交变的弱交流电信

号。它由三个相同的双铁心探头互相垂直叠放而成,用它来测量地球磁场沿船舶三个轴向的磁场分量。磁探头由铁心、励磁线圈、主反馈线圈、两组交叉反馈线圈和固定补偿线圈等组成。

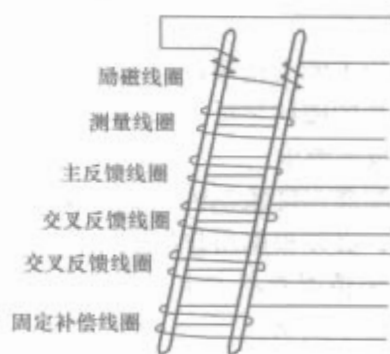


图 8.6-13 磁探头结构示意图

3.3.1.1 铁心

铁心为两片平行放置的坡莫合金片,在交流励磁电源作用下,铁心的磁导率不断的周期变化。

3.3.1.2 励磁线圈

励磁线圈是两组分别绕在两片坡莫合金片外面的线圈,它们的绕向一致。

3.3.1.3 测量线圈

测量线圈为绕制在两组励磁线圈的外面,包围着两个铁心。

3.3.1.4 主反馈线圈

主反馈线圈绕在测量线圈外面,其作用是与所测量磁场分量(X 、 Y 或 Z 分量)构成闭环系统,以改善系统的静态误差,补偿该分量的船舶感应磁场和消磁绕组在磁探头处产生的磁场。主反馈线圈把系统的输出量,经变换后反馈到输入端,与输入量进行比较。因此反馈量的稳定性对系统误差有直接影响。由于磁探头放置于桅杆上,周围的温度变化范围较大,主反馈回路需要加温度补偿措施,否则系统的误差较大,难以满足要求。通常采用具有负温度系数的电阻组合单元,与主反馈线圈串联,以降低温度变化对系统精度的影响。

3.3.1.5 交叉反馈线圈

交叉反馈线圈是两组依次绕在主反馈线圈外的线圈,信号取自其他两个分量的主反馈信号。该两组线圈是为了补偿其他两个分量的船舶感应磁场和消磁线圈在磁探头处的影响。

3.3.1.6 固定补偿线圈

固定补偿线圈是绕在交叉反馈线圈外的线圈。由控制仪器的直流稳压电源供电。该组线圈是为了补偿作用在磁探头上的船舶固定磁场。

利用主反馈线圈、两组交叉反馈线圈及固定补偿线圈的补偿作用,磁探头处所测量的磁场,基本就是作用在船舶三轴向方向的地球磁场。

3.3.2 磁探头组成

磁探头由骨架,磁心,绕组等组成。骨架包括由 4230 酚醛玻璃纤维压塑制成的骨架本体,由 3040 酚醛玻璃纤维布板制成的骨架嵌板及接线用的铆钉和焊片等部件组成。

3.3.2.1 磁心技术和工艺要求

磁心由两片长 40mm,宽 2mm,厚 0.1mm 的坡莫合金片组成(NI79M04, 0.1, YB129-62),一般在加工磁心片时有下列技术要求:

(1) 平直,无毛刺。

- (2) 最大磁导率不小于 $10^5 \mu_0$ 。
- (3) 在 10Oe 磁场中的磁通密度不小于 $7500 \times 10^{-4} \text{T}$ 。
- (4) 在每批制造加工时 (以 30 件计), 同时制标准样品环 10 件并一起进行热处理, 以检查是否符合 (2)、(3) 两项要求。
- (5) 热处理后不能受机械振动和弯曲。
- (6) 各磁心片的磁性尽量一致。

3.3.2.2 线圈技术要求

- (1) 采用聚酯高强度康铜纯丝漆包线。
- (2) 绕制时, 必须根据所选配的补偿电阻通过补偿试验确定电阻值, 电阻值误差不大于 $\pm 0.5\%$ 。
- (3) 应采用单个绕制。

- (4) 绕好后浸 3404 绝缘漆并老化。一般老化的具体要求是电阻通 1.5 倍额定电流, 温度 50°C , 时间为 48h。
- (5) 外层包一层电缆纸 (K-12, QB 131—61), 按实际要求电阻值填入标牌, 最外面包一层厚 0.1mm 的三醋酸纤维薄膜。

3.3.2.3 线圈温度补偿热敏电阻的配置

由于线圈电阻随温度变化关系为

$$R_L = R_0(1 + \alpha t) \tag{8.6-1}$$

式中: $\alpha = 0.004 \Omega/^\circ\text{C}$; t 为各种不同的温度值, $^\circ\text{C}$ 。所以要采用热敏电阻加以补偿。

3.3.2.4 探头线圈典型数据

探头线圈典型数据见表 8.6-1。

表 8.6-1 探头线圈典型数据

绕组绕制 顺序号		绕组名称		导 线				绕 组				出线铆钉号		
				名 称	牌 号	铜线标 称直径 (mm)	最大外 径漆包线 (mm)	每层 匝数	层 数	总匝数	20℃		首 S	尾 W
											电阻 (Ω)	电感 (mH)		
1	1a	励磁绕组 (内绕组)		高强度 漆包线	QQ 电 (D) 72—62	0.1	0.13	330	4	1320	~70	16.5	1	3
	1b					0.1	0.13	330	4	1320	~70	16.5	2	4
2		外绕组	测量			0.1	0.13	317	6	1902	180	57	5	6
3			主反馈			0.12	0.13	270	6	1620	120	42	7	8
4			交叉反馈			0.1	0.13	320	1	320	37	1.75	9	10
5			交叉反馈			0.1	0.13	320	1	320	37	1.75	11	12
6			固定补偿			0.2	0.24	160	7	1120	37	22	13	14

3.3.2.5 线圈工艺要求

在绕制各绕组时, 还应满足如下技术要求:

- (1) 严格按照绕线方向和绕线顺序绕线, 并按规定的出线铆钉号出线。
- (2) 内绕组 (又称励磁绕组) 1a 和 1b 的电感值的误差应小于 0.01mH, 电阻值的误差应小于 1Ω , 并尾尾和首首相连。
- (3) 线应均匀排列, 各层匝数也应相同。
- (4) 绕制内绕组前, 先在骨架上包一层电话纸 ($0.01\text{mm} \times 40\text{mm} \times 100\text{mm}$, QB 218—63), 然后在开始绕线。内绕组层间绝缘用 $0.01\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 电话纸一张。
- (5) 内绕组绕完后, 将探头骨架两部分粘合成一个整体。粘合时采用常温下干燥环氧树脂胶, 胶层不得厚于 0.05mm。
- (6) 外绕组层间绝缘用 $0.01\text{mm} \times 40\text{mm} \times 100\text{mm}$ 电话纸一张, 两组绕组之间用 $0.01\text{mm} \times 40\text{mm} \times 100\text{mm}$ 电话纸一张。
- (7) 匝间不得短路。
- (8) 引出线用 4~6 股绕组用的漆包线引出, 并用 LSn40 锡铅焊料焊接在接线片上。
- (9) 绕组浸 EA8340 绝缘漆, 表面涂 EM8363 防腐覆盖绝缘漆。注意不能使漆流入插磁心片的方孔内。
- (10) 浸漆完成后, 把磁心片轻轻地, 平直地插入孔内进行零场调试。磁心片插入前应包上电话纸 [$0.01\text{mm} \times 40\text{mm} \times (10 \sim 40)\text{mm}$], 包的厚度应使磁心片不能在孔内左右晃动。零场调试完毕后, 把两端的孔封死, 使磁心不能在孔内移动。
- (11) 整个调试完毕后, 在绕组外层包上标牌, 再包以

三醋酸纤维薄膜 $0.1\text{mm} \times 40\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。

3.4 磁强计式消磁系统抗干扰调整

消磁电流的控制信号为作用在舰船坐标系下的地球磁场, 在磁强计消磁控制设备中, 安装在桅杆上的磁传感器测量的磁场中除了地球磁场信号外还包括各种干扰磁场, 如果不将干扰磁场排除掉, 就不能发挥该类控制仪器能实时测量地球磁场进行控制的优点。

3.4.1 理想情况下的“标准圆”

(1) 安装磁强计消磁控制设备的消磁系统又称为“测地磁消舰磁”消磁系统。消磁系统绕组中的补偿电流 (I_x, I_y, I_z)^T 与传感器测量磁场 (h_x, h_y, h_z)^T 的关系可用下式表示

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} \tag{8.6-2}$$

式中: B 为消磁系统设备的磁场电流传递函数。

(2) 在传感器测量磁场中只含地磁场而不含任何干扰量的理想情况下, 式 (8.6-2) 可以表述为

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} = BA \begin{bmatrix} H_D \\ 0 \\ Z_D \end{bmatrix} \tag{8.6-3}$$

式中: A 为从地磁坐标系到舰船坐标系的转换矩阵, 则有

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\varphi\cos\psi, a_{12} = \cos\varphi\sin\psi, a_{13} = \sin\varphi, \\ a_{21} &= \sin\varphi\sin\theta\cos\psi - \cos\theta\sin\psi, \\ a_{22} &= \sin\varphi\sin\theta\sin\psi + \cos\theta\cos\psi, a_{23} = \cos\varphi\sin\theta, \\ a_{31} &= \sin\varphi\cos\theta\cos\psi + \sin\theta\sin\psi, \\ a_{32} &= \sin\varphi\cos\theta\sin\psi - \sin\theta\cos\psi, a_{33} = \cos\varphi\cos\theta \end{aligned} \tag{8.6-4}$$

θ 、 ψ 、 ϕ 分别为舰船的横摇角、纵摇角和磁航向角。

(3) 在水平状态下, 关系式为

$$\begin{aligned} I_x &= B_x H_D \cos \phi \\ I_y &= B_y H_D \sin \phi \\ I_z &= B_z Z_D \end{aligned} \quad (8.6-5)$$

从而可以看到:

1) 在水平转圈航行过程中, I_z 为一常量。

2) 一般情况下, 可以设置 $B_x = B_y$, 这时 $I_x - I_y$ 曲线为一圆形曲线, 如图 8.6-14 所示, 称为消磁系统的“标准圆”, 是消磁系统水平抗干扰调整是否合格的考核标准。

3) 即使没有任何干扰量, 当“水平转圈”的理想条件不能满足时, 理论上的输出电流将偏离“标准圆”(图 8.6-15), 这种情况下如果将消磁系统调整到标准圆反而会带来误差, 这也是水平抗干扰调整和电流测试要求舰船水平航行的原因。

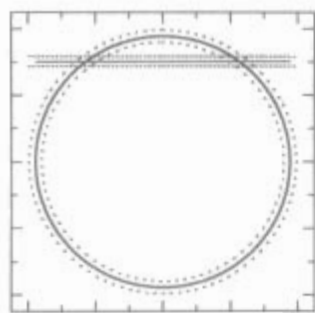


图 8.6-14 理想标准圆

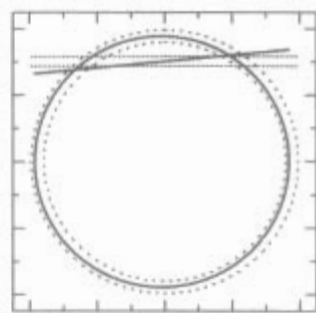


图 8.6-15 无干扰有倾斜的电流曲线

3.4.2 干扰磁场的种类

从舰船消磁系统磁传感器接收的干扰磁场的来源看, 主要有舰船磁场干扰、消磁绕组磁场干扰和传感器安装误差产生的干扰等三大类。

如果不在消磁电流调整器中增加任何补偿电路, 传感器接收到的磁场为

$$\begin{bmatrix} h_x \\ h_y \\ h_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} H_D \\ 0 \\ Z_D \end{bmatrix} + KA \begin{bmatrix} H_D \\ 0 \\ Z_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{px} \\ H_{py} \\ H_{pz} \end{bmatrix} + \eta \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H''_{px} \\ H''_{py} \\ H''_{pz} \end{bmatrix} \quad (8.6-6)$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (8.6-7)$$

称为感应磁化系数矩阵, 一般由舰船的形状及磁化状态决定; $(H_{px}, H_{py}, H_{pz})^T$ 为传感器接收到的舰船固定磁场

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_{xx} & \eta_{xy} & \eta_{xz} \\ \eta_{yx} & \eta_{yy} & \eta_{yz} \\ \eta_{zx} & \eta_{zy} & \eta_{zz} \end{bmatrix} \quad (8.6-8)$$

为感应消磁绕组干扰系数矩阵; $(H''_{px}, H''_{py}, H''_{pz})^T$ 为接收到的固定补偿消磁绕组产生的干扰磁场。

理想情况下, 磁传感器的三轴应严格与舰船坐标系方向一致, 但是由于工艺原因很难实现, 从而产生测量误差。研究表明, 这种测量误差可以等效在舰磁干扰中, 不必单独调整。

3.4.3 抗干扰调整原理

根据磁通门磁传感器消磁电流调整器的具体实现形式, 抗干扰原理分为数字补偿抗干扰和磁场补偿抗干扰两种。

3.4.3.1 数字式抗干扰原理

(1) 数字式抗干扰调整应用在数字式磁通门消磁电流调

整器, 该调整器在磁传感器中没有干扰补偿电路, 控制仪借助计算机的运算, 从测量的磁场信号中, 用数字补偿的方法输出实际电流控制信号。

(2) 从式 (8.6-6) 中可以看到, 磁场信号中只应保留右边第 1 项, 其余 4 项干扰量是要通过数字方式进行补偿的, 抗干扰调整的关键是如何获得感应磁化系数矩阵 K , 感应绕组系数矩阵 η , 舰船的固定干扰磁场和固定绕组干扰磁场。

3.4.3.2 磁场补偿式抗干扰原理

(1) 在大多数消磁系统电流调整器中, 都采用磁场补偿式抗干扰原理, 如图 8.6-2 所示, 在每个分量传感器中, 都设计了补偿干扰磁场的“补偿绕组”, 共增加 4 个补偿线圈, 分别称为“主反馈”、“第一交叉反馈”、“第二交叉反馈”和固定补偿线圈, 图 8.6-16 给出了 X 分量传感器的干扰量补偿原理框图。

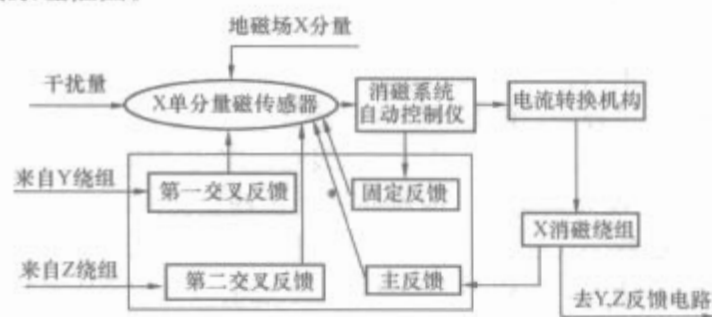


图 8.6-16 X 分量传感器的干扰量补偿原理框图

(2) 对于 X 分量传感器, 进入到主反馈线圈、第一交叉反馈线圈和第二交叉反馈线圈中的补偿电流大小分别与消磁系统输出电流 $(I_x, I_y, I_z)^T$ 成正比, 固定补偿线圈中的补偿电流单独供电, 要视舰船的固定干扰磁场决定。

(3) 对于 Y 和 Z 分量传感器, 可以作同样的分析, 从而形成了 12 个比例电位器 (及其反向开关) 需要调整。

3.4.3.3 抗干扰调整

通常所说的抗干扰调整, 就是要根据干扰磁场调整上述 12 个电位器, 使消磁系统感应补偿电流的关系满足式 (8.6-5) 的变化关系, 在某地的水平感应消磁补偿电流曲线满足如图 8.6-14 所示的标准圆。

3.4.4 水平抗干扰和跨纬度抗干扰

3.4.4.1 消磁系统输出电流的数学关系

消磁系统输出电流的数学关系为

$$\begin{bmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \{E - B(\eta + \zeta)\}^{-1} B \left\{ (E + K) A \begin{bmatrix} H_D \\ 0 \\ Z_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x i_{px} + H_{px} \\ b_y i_{py} + H_{py} \\ b_z i_{pz} + H_{pz} \end{bmatrix} \right\} \quad (8.6-9)$$

式中: E 为单位矩阵。

3.4.4.2 抗干扰调整后的补偿关系比较式 (8.6-3) 和式 (8.6-9) 可以看到, 抗干扰调整完毕理想情况下, 有下述两种关系存在:

(1) 固定补偿和固定干扰磁场的关系

$$\begin{bmatrix} b_x i_{px} \\ b_y i_{py} \\ b_z i_{pz} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H_{px} \\ H_{py} \\ H_{pz} \end{bmatrix} \quad (8.6-10)$$

说明固定补偿仅用以补偿固定干扰磁场。

(2) 在满足式 (8.6-10) 条件下, η 、 ζ 、 B 、 K 满足下述关系

$$\{E - B(\eta + \zeta)\} B = B(E + K) \quad (8.6-11)$$

说明由于舰船感应磁化干扰量的存在,不可能只将感应绕组干扰量补偿到零,而必须利用一部分绕组干扰量来补偿舰船感应干扰量。

3.4.4.3 舰船在下列情况下必须重新进行抗干扰调整。

(1) 舰船经过固定磁场消磁,使式(8.6-10)中的固定干扰磁场发生了变化。

(2) 消磁绕组经过了调整,使式(8.6-11)中的绕组干扰系数矩阵 η 发生了变化。

(3) 消磁系统控制设备发生故障经修理后,使式(8.6-11)中的绕组干扰系数矩阵 B 或 ζ 发生了变化。

3.4.4.4 水平抗干扰调整

(1) 水平抗干扰调整就是先调整各种干扰量的水平分量,通过标准圆来判断消磁电流水平分量是否调整合格。

(2) 目前能够进行水平抗干扰调整有如下方法:

1) 经验调整法。所谓经验调整方法是依靠有丰富调整经验的技术人员,在风平浪静海况条件下,在舰船不断水平转圈航行过程中,依据经验进行调整。用x-y记录仪记录水平感应消磁电流,使消磁电流曲线在给定的“标准圆”内。

2) 四航向调整法。四航向抗干扰调整使用在一种基于单片机的数字式磁通门消磁电流调整器上,利用单片机的存储和计算能力,每到一个地方,在手动输入当地消磁水平电流后,通过舰船分别在4个航向上磁场的测量,解算出相应的水平干扰补偿,通过修正后的磁场信号控制水平消磁电流。

舰磁干扰模拟量模拟法。上述两种方法在每次调整时,都需要舰船出海航行。“舰磁干扰量模拟法”是基于舰船消磁系统的 S 矩阵,通过传感器中的电磁线圈,在舰船停泊或直线航行状态下,模拟产生舰船实际航行时的消磁电流曲线,从而实现舰船停泊状态下或直线航行状态下的抗干扰调整。借助计算机智能辅助软件,实现无需专业人员进行快速抗干扰调整。

该方法依赖 S 矩阵的测量(对每条舰船,在不更换传感器条件下,只需一次测量),对于水平抗干扰调整,只需通过在4个航向上测量 S 矩阵的水平分量。

3.4.4.5 跨纬度抗干扰调整

(1) 水平抗干扰调整只能保证舰船在调整地的磁性防护能力,要保证舰船在跨纬度区航行时的消磁电流满足式(8.6-3),必须进行跨纬度区的抗干扰调整。

(2) 对于经验调整方法和4航向抗干扰调整方法,原理上只能通过在两个不同纬度区的测量来进行,称为“两地测量”。但是由于抗干扰调整频繁,每次都进行这种测量是不现实的。

(3) 在无法进行“两地测量”情况下,也可以在进入需要磁性防护的海区前,根据当地地球磁场再进行一次当地的水平抗干扰。但是此种方法存在两种缺陷。

1) 无法保证在两个调整地之间舰船的磁性防护能力。

2) 在其他调整地,地球磁场的的数据只能通过地磁图或地球模型进行计算,难以实现实时测量地球磁场进行控制的优点,其性能不会超过“地磁解算”式消磁电流控制设备。

3) 在能够通过舰船的摇摆,测量到消磁系统的3维 S 矩阵条件下,舰磁干扰量模拟法能够实现在一个地区调整就能满足舰船跨纬度航行的磁性防护能力。

3.4.5 “舰磁干扰量模拟”抗干扰调整原理

3.4.5.1 基本原理

舰磁感应干扰量模拟方法的基本思想是,在船舶停泊或直线航行状态下,通过在传感器中的电磁线圈施加电流,模

拟产生舰船任意地点、任意状态下的实际干扰磁场。如图8.6-17所示。

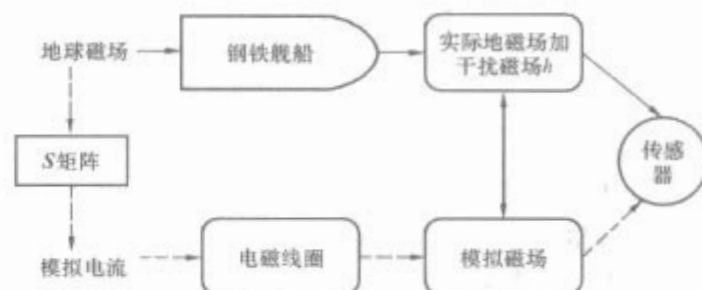


图 8.6-17 舰船感应干扰量模拟示意图

模拟电流的大小除了与被模拟地的地磁场、舰船姿态有关外,还决定于舰船的感性磁化传递系数和电磁线圈的电磁场数,后两者的组合就是所谓的 S 矩阵。

3.4.5.2 三维 S 矩阵

(1) 三维 S 矩阵的作用是用来计算通道模拟线圈中的模拟电流 $[i_{ix}, i_{iy}, i_{iz}]^T$,与被模拟作用到舰船上地磁场 $(H_x, H_y, H_z)^T$ 的数学关系为

$$\begin{bmatrix} i_{ix} \\ i_{iy} \\ i_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (8.6-12)$$

$$\text{或} \quad S = D^{-1}F \quad (8.6-13)$$

式中: $F=E+K$ 为地磁场作用到舰船的传递函数; D 为磁传感器的电磁常数矩阵。

(2) 对于确定的舰船和磁传感器,线圈电磁常数 d_x, d_y, d_z 不变,舰船感应干扰传递系数 K 一般也不会变化,所以 S 矩阵与消磁系统控制仪器放大倍数等状态无关,是舰船消磁系统的一个重要特征量。只要不更换传感器, S 矩阵就会保持固定不变。

(3) 加入模拟电流的作用是希望当舰船在当前地磁场 $[H_D^0, 0, Z_D^0]^T$,当前姿态 A_0 情况下,模拟产生另外任意地方、任意舰船状态下的消磁系统实际输出电流。如果要产生地磁场 $[H_D^1, 0, Z_D^1]^T$ 处舰船姿态为 A_1 的消磁系统电流

$$I_1 = C \left\{ FA_1 \begin{bmatrix} H_D^1 \\ 0 \\ Z_D^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x i_{px} + h_{px} \\ b_y i_{py} + h_{py} \\ b_z i_{pz} + h_{pz} \end{bmatrix} \right\} \quad (8.6-14)$$

则所加的模拟电流应为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{ix} \\ i_{iy} \\ i_{iz} \end{bmatrix} &= D^{-1} F \left\{ A_1 \begin{bmatrix} H_D^1 \\ 0 \\ Z_D^1 \end{bmatrix} - A_0 \begin{bmatrix} H_D^0 \\ 0 \\ Z_D^0 \end{bmatrix} \right\} \\ &= S \left\{ A_1 \begin{bmatrix} H_D^1 \\ 0 \\ Z_D^1 \end{bmatrix} - A_0 \cdot \begin{bmatrix} H_D^0 \\ 0 \\ Z_D^0 \end{bmatrix} \right\} \quad (8.6-15) \end{aligned}$$

(4) 当以水平状态舰船在固定航向上,要模拟舰船在当地的水平转圈航行,所加模拟电流的变化关系为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{ix} \\ i_{iy} \\ i_{iz} \end{bmatrix} &= S(A_1 - A_0) \begin{bmatrix} H_D^0 \\ 0 \\ Z_D^0 \end{bmatrix} \\ &= S \begin{bmatrix} \cos\psi - \cos\psi_0 & \sin\psi - \sin\psi_0 & 0 \\ -\sin\psi + \sin\psi_0 & \cos\psi - \cos\psi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_D^0 \\ 0 \\ Z_D^0 \end{bmatrix} \quad (8.6-16) \end{aligned}$$

即

$$\begin{bmatrix} i_{ix} \\ i_{iy} \\ i_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(\cos\psi - \cos\psi_0)H_D^0 - S_{12}(\sin\psi - \sin\psi_0)H_D^0 \\ S_{21}(\cos\psi - \cos\psi_0)H_D^0 - S_{22}(\sin\psi - \sin\psi_0)H_D^0 \\ S_{31}(\cos\psi - \cos\psi_0)H_D^0 - S_{32}(\sin\psi - \sin\psi_0)H_D^0 \end{bmatrix} \quad (8.6-17)$$

式中: ψ 和 ψ_0 分别为要模拟的航向和所处的磁航向, 说明在进行当地水平模拟时, 只需要 S 矩阵的水平分量以及水平分量对垂向分量的干扰影响。

3.4.5.3 智能抗干扰调整技术

智能抗干扰技术主要解决调整过程中不需要专家调整的问题。借助专用便携式抗干扰仪器, 在实时数据采样和模拟状态改变过程中, 在计算机的实时显示下, 指挥相关人员进行指定电位器的调整, 计算机自动判断某种干扰量是否补偿到位。调整的顺序是, 先调整联立三个固定干扰量, 然后依次联立调整各个分量主干扰量和对该分量对其他两个分量的交叉干扰量。

3.4.5.4 三维 S 矩阵测量原理

“地磁干扰量模拟法”的前提是能够获得舰船消磁系统的 S 矩阵。对于特定的舰船和磁传感器, 只需进行一次测量。

(1) 停泊状态测量仪器放大倍数。

1) 定义

$$M_{l,m} = \left(\frac{\partial I_l}{\partial i_m} \right)_{i_l=0, i_m=0} \quad (l, m, n = 1, 2, 3) \quad (8.6-18)$$

式 (8.6-18) 为单位 m 分量模拟电流变化对 l 分量消磁电流的影响矩阵, 它与仪器放大倍数矩阵 C 和传感器电磁常数矩阵 D 的关系为

$$M = CD \quad (8.6-19)$$

2) 依次改变 3 个分量中的模拟电流值, 测量各个分量消磁电流的变化, 就能通过式 (8.6-18) 求得矩阵 M 。

(2) 磁主航向上测量 S 矩阵水平分量。

1) 舰船水平状态下, 分别在磁东、南、西、北 (分别对应 $\psi = 90^\circ$ 、 180° 、 270° 和 0°) 上测量消磁系统输出电流 I^E 、 I^S 、 I^W 和 I^N , 并定义

$$I^{NS} = \frac{I^N - I^S}{2}, I^{EW} = \frac{I^E - I^W}{2} \quad (8.6-20)$$

2) 利用 S 矩阵的定义式 (8.6-13) 和 C 矩阵与 M 的关系 (8.6-19), 可以得到 S 矩阵的第一列和第二列分别为

$$S^{<1>} = \frac{M^{-1} I^{NS}}{H_D}, S^{<2>} = -\frac{M^{-1} I^{EW}}{H_D} \quad (8.6-21)$$

式中: H_D 为测量地的地磁场水平分量。

(3) 磁东主航向上测量 S 垂向矩阵, 磁东航向无纵倾情况下, 利用对称横摇角 θ_0 消磁电流的差值

$$I_{\theta_0} = \frac{I(\theta_0) - I(-\theta_0)}{2\sin\theta_0} \quad (8.6-22)$$

可以得到 S 矩阵第三列为

$$S^{<3>} = \frac{M^{-1} I_{\theta_0} - S^{<2>} Z_D}{H_D} \quad (8.6-23)$$

式中: Z_D 为测量地的地磁场垂直分量。

4 地磁解算式消磁电流控制仪

地磁解算式消磁电流控制仪获得地球磁场的方式是根据船舶所在位置, 利用“地磁模式组”数学方法计算当地地球磁场, 根据船舶的航向和姿态计算投影到船舶坐标系上的地磁分量, 实施对消磁系统电流的全自动控制。

这类控制设备的优点是既能实现全自动调整, 又不需要进行复杂的抗干扰调整, 且由于使用了计算机系统, 能方便地实现分布式消磁电源控制和消磁系统的智能调整和监控, 缺点是不能对变化的地磁场和局部异常地磁场作出反应, 电流控制精度决定于“地磁模式组”的计算精度。

4.1 仪器组成

地磁解算式消磁电流控制仪一般由主控制器和分控制器组成, 对于大型船舶, 还应增加远程智能终端。

图 8.6-18 是以地磁解算为控制核心的分布式地磁解算消磁系统示意图。其中与磁传感器的接口是为了增加控制仪器的通用性, 在适合安装磁传感器的船舶条件下, 直接利用测量的地磁场进行控制; 或在适合闭环控制的船舶上, 利用磁场信号分析船舶的固定磁场变化, 实现对船舶固定磁场变化的闭环控制。



图 8.6-18 分布式地磁解算消磁系统示意图

(1) 主控制器。

1) 主控制器主要作用是根据船舶位置进行地球磁场的解算和与综合导航系统的数字通信, 所以地磁解算式消磁电流控制器必须是基于有高速计算能力的微处理器为核心的控制设备。

3) 微处理器的可以选用多单片机并联运行、DSP 模块或军用独立计算机等, 三种形式各有优势。前两者可以做到体积小、启动快和高可靠性, 但是应用软件研制相对困难。后者硬件研制简单, 可选用系列化的通用模块, 软件研制相对容易。

4) 由于采用了数字化的主控制器, 消磁电流控制器与消磁电源之间的连接可采用总线形式和进行数字通信, 改变了以往模拟量控制的方式, 从而增加了系统的电磁干扰能力并且容易进行分布式电源控制。

(2) 分控制器。

1) 分控制器的主要作用是接收主控制器的消磁电流数字信号; 将数字信号转化为模拟信号供给静止电源并将静止电源的输出电流电压信号, 以及电源的工作状态转换成数字信号传送给主控制器。

2) 分控制器一般由单片机或 DSP 等为处理器为核心的 AD/DA 转换电路组成。

3) 在数字化模块静止电源中, 可以实现分控制器的功能, 这时需规定与主控制器的总线方式和通信协议。

(3) 远程智能终端。

1) 远程智能是利用计算机接口技术, 实现如下功能的智能化水平:

a. 消磁绕组调整智能化: 随着船舶消磁绕组分区数量增加, 绕组安匝数的调整越来越困难, 借助专用智能化软件技术, 可以方便地实现消磁系统安匝数优化调整, 特别是战时因某种原因坏掉一些区段时, 能及时进行安匝数的优化重组, 达到磁性防护的最优水平。

b. 消磁电流自动设定: 对于以电流设定为主的消磁系统安匝数调整, 在对电源设备手动调整部分进行适当改进后, 能在接受到船舶测量磁场情况下, 实现安匝数的自动调整。对于分布式电源绕组供电, 且在每个绕组中进行固定、感应和涡流磁场混合补偿电流, 该自动化的实现尤为重要, 可以减少目前大量的调整时间。当具备与磁性检测站的智能通信接口后, 还能实现消磁系统的快速在线调整。

c. 船舶消磁系统智能监视: 可以在任意地点、任意航向显示不同区段和类型(固定、感应及涡流)消磁电流, 并与理论值进行比较; 可以在任意地点、任意航向显示船舶的磁性状态并根据敌方水雷等有关情报, 预报水雷的威胁程度, 为指挥员提供决策依据并依靠改变船舶航向等措施改变船舶的磁性状态。

d. 消磁控制设备监控: 可以作为消磁控制设备主控制器的备份, 在主控制器失效时直接发出信号对消磁电流实施控制。

2) 和主控制器一样, 远程智能终端设备可以选用多单片机并联运行、DSP 模块或军用独立计算机等构成。

4.2 工作原理

(1) 主控制器工作原理。图 8.6-19 给出了基于单片机并联运行方式工作的主控制器原理图, 该仪器负责向 3 个分控器发送和接收数据。共使用了 3 片微处理器进行并联工作。其中:

1) MPU3 负责接收导航信号, 通过一个双口 RAM 与

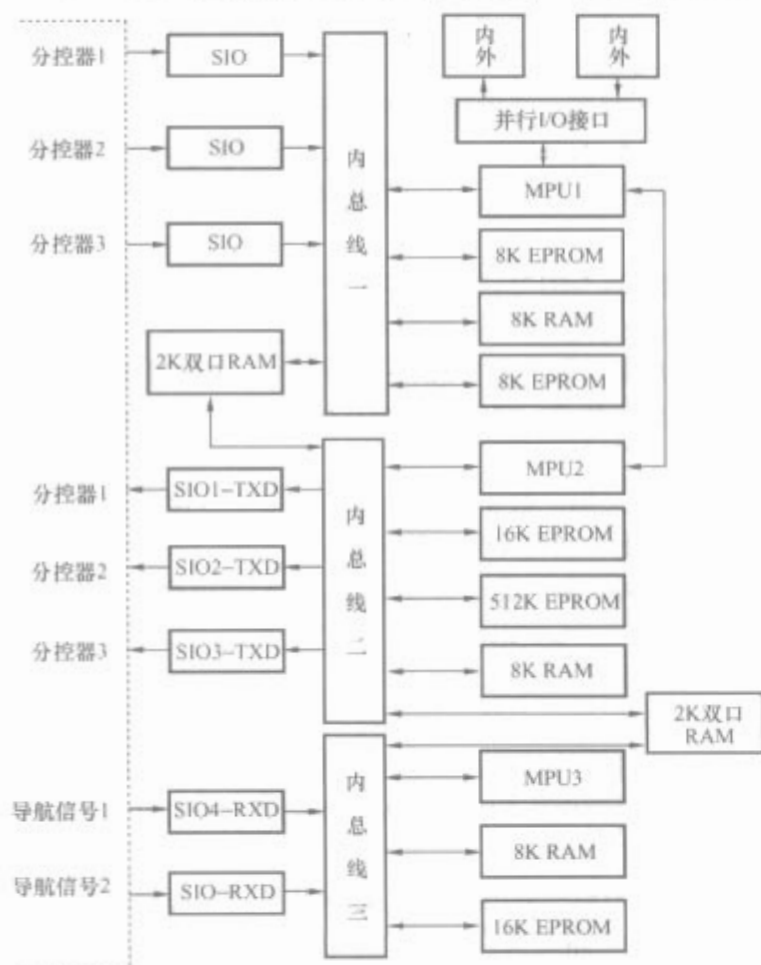


图 8.6-19 基于单片机并联运行方式工作的主控制器原理图

MPU2 进行数据交换。

2) MPU2 负责地磁场的计算和向分控器发送电流信号。

3) MPU1 主要负责接收分控器数据、进行相关误差和故障分析, 回传电流电压显示和键盘管理。

(2) 分控制器工作原理。

图 8.6-20 给出了以多单片机并联运行方式工作的分控器原理框图, 每 4 路静止式消磁电源为一组, 每组对应一个分控器。分控器与主控制器进行数字通信, 对静止电源的模拟量进行转换, 主要实现如下功能:

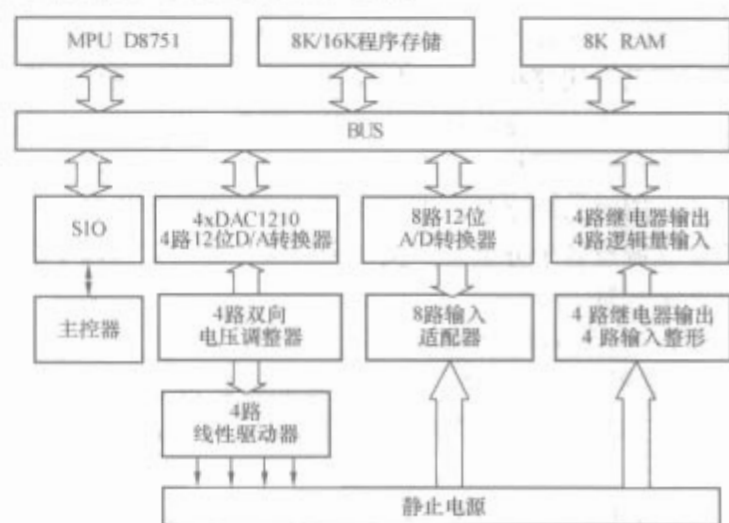


图 8.6-20 基于单片机并联运行的分控制器原理图

1) 接收主控器的开机信号, 将静止电源的控制回路电源接通。

2) 在开机过程中, 接收主控器的初始设置参数。

3) 接收主控器的标准电流控制信号, 根据设置参数计算各路电源的消磁电流控制信号。

4) 将电路控制数字信号转换成模拟信号送给静止电源。

5) 将静止电源的各路实际输出电流电压模拟信号转换为数字信号。

6) 接收静止电源故障开关量信号。

7) 向主控制器回传实际输出的消磁电流、电压信号。

4.3 仪器功能

以三微处理器并联主控制器为例, 控制仪器主要具备开机自检、参数设置、电流直接输出、自动运行和手动运行功能。

(1) 开机自检: 开机后, 仪器通过 20A 电流的输出信号, 检查回传电流、电压和电源状态, 确定消磁系统能正常工作。

(2) 参数设置: 在进行消磁绕组调整时, 确定每路消磁电流与地磁场的比例系数, 通过参数设置存储在控制器中。

(3) 电流直接输出: 在进行消磁绕组效率测量时, 直接给定电流信号向消磁绕组供电。

(4) 自动运行: 在导航信号通信正常条件下, 实现消磁电流的自动控制。

(5) 手动运行: 当无综合导航信号时, 通过手动设置经度、纬度和舰船的航向数据进行消磁电流控制。

(6) 其他功能: 除上述功能外, 仪器还具备如下功能。

1) 导航信号自动识别功能: 当存在两路以上导航信号时, 自动将传输速度高的信号接入。

2) 报警功能: 当消磁电流超差或电源故障或无综合导航信号时, 实现声光报警。

3) 电流缓变功能: 在消磁系统控制设备开机和关机过程中, 为了减少对舰船磁场的冲击, 电流是缓慢上升或

下降。

4) 电流保持功能: 当控制器在自动工况下出现故障时, 仪器自动保持故障出现前的消磁电流控制信号。

4.4 性能参数

(1) 主控制器特性。

1) 数据传输特性。

a. 三处理器之间的信息交换是通过双口 RAM 并采用中断技术进行的, 具有极快的交换速度。

b. 与综合导航仪和与 3 个分控器之间的高速数据通信, 是通过 5 路全双工 RS-422 串行通信接口进行的, 速度为 19 200bit/s。

c. 面板显示的数据通过数据总线、由地址总线直接寻址快速传送给接口芯片, 显示采用锁存方式, 不要计算机经常维护。

d. 主控制器内外面板上的开关及按键命令, 通过数据总线、由地址总线直接寻址快速读入 MPU。

2) 硬件特性。

a. MPU: D8031x2, DS80C320。

b. 系统时钟: 11.095 2MHz。

c. 程序存储器: 16KB+8KB+512KB。

d. 数据存储器: 8KB+8KB。

e. E²PROM: 8KB。

f. EPROM: 4KB。

g. 双口 ROM (通信专用): 2KB×2。

h. 串行通信接口: 5 路全双工通信接口, 符合 RS422 标准, 波特率为 19.200kbit/s, 各通信接口波特率允许单独设置, 通信距离大于 500m。

i. 控制数据刷新速度: 20 次/s。

j. 测量、显示数据刷新速度: 2 次/s。

k. 主控制器的电源线和主控制器与外部通信的所有接线均由主控制器下部的 10 个接插件引入和引出。

l. 显示器: 62 位数码显示+58 个 LED 灯光指示。

m. 按键: 34 键+2 开关。

n. 电源: AC220V±20%, 50Hz。

o. 输入功率: 0.5kW。

p. 熔丝: 3A。

q. 工作方式: 连续。

(2) 分控器特性。

1) MPU: D8751。

2) 系统时钟: 11.095 2MHz。

3) 程序存储器: 16KB。

4) 数据存储器: 8KB。

5) 串行通信接口: 1 路全双工通信接口, 符合 RS422 标准, 波特率为 19.200kbit/s, 通信距离大于 500m。

6) 模拟输出通道: 4 路 12 位高精度 DAC1210 数模转换器和输出电路构成的模拟输出通道, 满程输出电压为 ±10V。

7) 模拟输入通道: 8 路线性输入通道, 每一通道均有独立的输入适配器、滤波器和标定电路, 输入电压在 ±10V、±5V 范围内选择。输入的模拟量由 12 位模数转换器 ADC1210 转换成 12 位数字量。

8) 继电器输出通道: 4 路继电器输出通道, 每一通道驱动负载电流大于 1A。

9) 逻辑输入通道: 4 路开关量逻辑输入通道。

10) 控制数据刷新速度: 20 次/s。

11) 测量数据刷新速度: 2 次/s。

12) 电源: DC24×(1±20%) V。

13) 分控制器的电源线、分控制器与外部通信的通信接线、分控制器对电流控制器的控制信号输出线, 以及电流控制器反馈给分控制器的电流电压信号引入线, 均由分控制器下部的 10 个接插件引入和引出。

14) 工作方式: 连续。

5 消磁控制设备误差测量

5.1 仪器误差定义

消磁电流控制设备通常用静态误差、动态误差 (跟踪误差)、稳定误差来衡量仪器的性能。

5.1.1 静态误差

一般静态误差的测试方法有: 用较精确的电流表 (0.5 级以上的电流表) 测试, 误差测试仪测试等方法。

5.1.1.1 电流表测试法

(1) 采用此方法测试时, 必须用平行环人为产生标准输入信号, 用电流表测试静止电源输出的消磁电流值 (实测值), 和理论值进行比较。其定义是

$$\Delta I\% = \frac{I_{th} - I_0}{I_{mth}} \times 100\%$$

式中: I_{th} 为消磁绕组理论电流值; I_0 为消磁绕组电流实测值; I_{mth} 为消磁绕组最大理论电流值。测得误差必须满足仪器技术要求。

(2) 具体测量方法 (以 X 分量为例)。

1) 将磁探测器置于平行环中心位置。

2) 起动仪器预热 20~30min 后, 起动消磁电源, 使整个系统投入正常工作状态。在平行环中通入直流电流。其大小按下式计算

$$I = \frac{H_D \sin \phi}{K} \quad (8.6-24)$$

式中: I 为通入平行环中的电流值, A; H_D 为当地地球磁场水平分量, Oe; ϕ 为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 任意角, 一般按每 10° 为一测量点; K 为平行环常数。

3) 读取相应每一测量点的消磁绕组中的电流值 I_0 。

4) 按下式计算误差

$$\Delta I = \frac{I_m \sin \phi - I_0}{I_m} \quad (8.6-25)$$

式中: I_m 为该舰艇该分量在当地最大设计值。

5.1.1.2 误差测试仪测试静态误差法

基于采用单板机或计算机的便携式消磁系统误差测试仪器, 能自动同时能测出消磁电流调整器的静态误差、动态误差 (跟踪误差)、过渡指标等, 并能进行数据和曲线打印, 是目前较理想的检测设备。

5.1.2 动态误差

动态误差表征了动态性能的优劣, 是消磁控制仪器的重要技术指标之一。其测试方法有用 X-Y 记录仪和误差测试仪等。

(1) X-Y 记录仪测试法。

1) 记录纸上画有三个半径分别为 10、10.5 和 9.5cm 的同心圆, 中心圆为标准值。将 X-Y 记录仪的比例调好, 当消磁电流为最大值时, 记录笔分别落在记录纸的中心圆与 X、Y 轴的四个交点上。

2) 起动仪器系统, 预热 20~30min 后, 起动消磁电源并投入正常运行状态。

3) 在平行环中加入一个按正弦或余弦信号变化一周时,记录纸上记录的曲线不得超过外圆和内圆。

(2) 误差测试仪测试。使用误差测试仪测试消磁电源的动态误差,方法同测试静态误差。

5.1.3 稳定误差

系统的稳定误差可以用电流表或用误差测试仪进行测量。

(1) 电流表测量系统的稳定误差。

1) 选择较精确的电流表,接入消磁绕组回路。

2) 起动仪器预热 20~30min,再起动电机扩大机使整个系统投入正常工作状态。给平行环加入一恒定值,读取此时消磁绕组电流值 I_1 。

3) 保持输入信号不变,将其负载短路 20%作一抗动量,待系统稳定后,读取此时消磁绕组的电流值 I_2 。

4) 按下式计算稳定误差

$$\epsilon = \frac{I_1 - I_2}{I_1} \times 100\% \quad (8.6-26)$$

要求误差应满足技术要求。

(2) 误差测试仪。使用误差测试仪测试消磁电源的稳定误差,方法同测试静态误差。

5.2 过渡过程

(1) 参数定义。当送给消磁电流控制仪、消磁电源变流装置或设备的测试信号由最大幅值的 -35% 阶跃到 35% 时,测试其输出的超调量 Q 、过渡过程时间 T 、振荡次数 N 即为过渡过程测试。测试参数的定义如下:

1) 超调量

$$Q = \left| \frac{I_{\max} - I(\infty)}{0.7I_{\text{额}}} \right| \times 100\% \quad (8.6-27)$$

式中: $I_{\text{额}}$ 为额定电流; I_{\max} 为过渡过程中输出电流的最大值; $I(\infty)$ 为稳定输出电流值。

2) 过渡过程时间 T 。当 $t \geq T$ 时

$$|I(t) - I(\infty)| \leq \delta \quad (8.6-28)$$

式中: $I(t)$ 为过渡过程中的输出电流值; $I(\infty)$ 为稳定输出电流值; δ 一般为 $I(\infty)$ 的 5%。

3) 振荡次数 N 。以 $I(\infty)$ 为中心,在过渡过程时间 T 内,输出电流振荡周期的个数。

(2) 测试方法。设备进入运行状态后,使用误差测试仪进行测量,测量结束后误差测试仪会自动输出测量结果。



第7章 船舶电场防护技术

1 船舶电场分类

目前已完成的初步研究和有限实验数据表明,船舶电场和低频电磁场可以成为水中兵器新的信号源。早在20世纪50年代末,苏联专家就提供了有关船舶电场的零星资料,指出在距船舶10m处,船舶电场强度可达到 $2\sim 3\text{mV/m}$ 的量级。苏联在当时就已装备了利用潜艇电场信号动作的非触发反潜锚雷KCM。国外对船舶电场的研究工作已经取得相当的成就,不仅被应用于水中兵器引信,而且已研究了相应的防护措施。按产生机理的不同,通常把船舶电场分为以下几种:

- (1) 腐蚀电场:船体不同材料之间的腐蚀电流产生的电场。
- (2) 防腐电场:由于在船体上施行各种防腐措施(包括外加电流保护装置和牺牲阳极等)所产生的电场。
- (3) 漏电场:船体漏电流产生的电场。
- (4) 感应电场:由船体运动包括船体直线运动及摇摆切割磁力线引起的电磁感应产生的电场。
- (5) 摩擦电场:摩擦等因素产生的电场。
- (6) 尾流电场:由船舶航行运动产生的尾流所产生的电场。

在船舶静止时上述(1)~(3)种船舶电场存在,而(4)~(6)三种电场只有船舶运动时才产生。

按频率来划分,船舶电场通常分为两类,即静电场和交变电场。由上述(1)、(2)两种因素产生的电场构成了船舶静电场,而船舶交变电场则来源于上述(2)~(6)五种因素。

1.1 船舶腐蚀电场

船体通常是钢铁制成的,螺旋桨是青铜合金制成的,这些不同的金属都在海水电解质中,金属的不同电位便导致船体表面上的不同电位分布。如果不同电位的金属之间发生电连接,那么就开始腐蚀过程。电化学腐蚀过程中有电流产生,由此产生的静电场作为腐蚀电流的电压降就可在有电阻的海水中测量到。这些电流最常见的来源之一是钢质船壳和铜质螺旋桨,强电流从船壳流向螺旋桨,从而导致了船壳的腐蚀。腐蚀电流的强度取决于不同的参数,如船体的涂层状态和海水的电磁参数等。

1.1.1 腐蚀电池的分类

在电化学腐蚀中,腐蚀电池起着重要的作用。根据构成腐蚀电池的电极大小,可将腐蚀电池分为宏观和微观两种。

(1) 宏观腐蚀电池是肉眼可见电极构成的宏观大电池,它引起金属零件或构件的局部宏观腐蚀破坏。包括异金属接触电池、浓差电池和温差电池。其中,两种具有不同电位的金属或合金相互接触并处于同一电解质溶液中时,便会使电位较低的金属不断遭到腐蚀,这种电池称为异金属接触电池或称腐蚀电偶,引起电偶腐蚀。两种金属的电位差越大,电偶腐蚀越严重。例如Fe-Cu电池、装有冷却水的冷凝器的碳钢壳体与黄铜管子构成异金属接触电池。同一金属的不同部

位与浓度或温度不同的介质接触构成的腐蚀电池,最常见的有氧浓差电池、盐浓差电池和温差电池等。浸于电解质溶液中的金属,其不同部位处于不同温度时构成的电池为温差电池。

(2) 微观电池是指零件金属表面由于电化学不均匀性构成许多微小电极的电池,又称为微电池。零件金属表面电化学不均匀性是由于金属的微观不均匀性引起的。

1.1.2 腐蚀电流与腐蚀速率

腐蚀电流的一部分从保护阳极流向青铜螺旋桨,最终通过轴系、传动装置、轴承、船体又回到焊接在船体上的保护阳极处。当轴系转动时,腐蚀电流受到了轴系、传动装置和轴承之间的可变接触电阻的调制。此种调制电流在船舶周围产生可被探测到的低频电场,而交变的电场比静电场更容易探测。图8.7-1是轴速率调制低频信号源的示意图,其中 R_B 为轴承座的阻抗, U_{sh} 是转轴对船体的电位差。如果电流矩 p 为 10Am 量级或更大,船舶电场在10m左右信号达 1mV/m 量级。

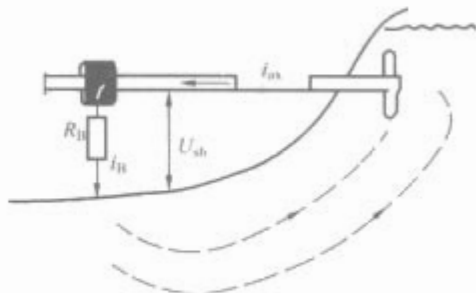


图 8.7-1 轴速率调制低频信号源示意图

1.2 船舶防腐电场

为了保护船壳和船的其他水下部分免遭腐蚀,航行于海上的船舶安装了无源锌阴极保护系统或有源阴极保护系统。在一个典型的有源阴极保护系统中,如图8.7-2所示,高电流、低电压的直流电源的正端连到一个从船壳伸出的铂(或类似的)阳极,负端直接连到船壳。根据要求保护的复杂程度,也许有几个电源,每个电源连接多个阳极。一个参比电极也伸出船壳,测量船壳电动势并通过一个反馈系统自动调整保护水平。

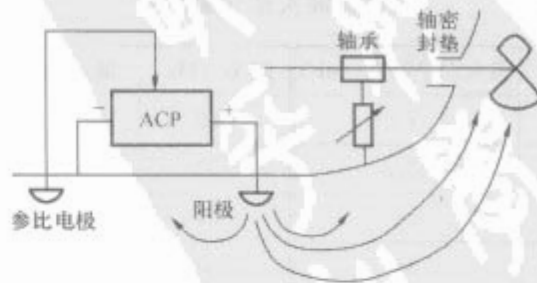


图 8.7-2 一个典型的有源阴极保护系统

显然,安装了阴极保护系统的船舶,其电流从阴极保护系统的阳极流向船舶的钢质船壳和铜质螺旋桨,这些电流产生了船舶的静电场。由于螺旋桨的转动扰动了静电场,从而产生了一种交变电场。

采取外加电流阴极保护,船舶防腐电流高达 $10 \sim 100\text{mA}/\text{m}^2$ 。防腐使船舶的电场大大增强。主动阴极保护系统引起的电磁辐射有两种原因,一种原因是因为参考电极的信号波动引起保护电流的变化,参考电极的信号也受到同如前所述诸多因素的影响,经过反馈系统调整阳极电位变化。另一种原因是电源中的寄生振荡及其谐波直接传入水中。事实上,目前大多数是使用晶闸管恒电位仪,其开关辐射是相当严重的,整流的波纹脉动也较大。

1.3 船舶漏电场

船舶的电源系统、由旋转部件引起的涡流激励场、船舶电网中有电流流过的电缆、交流电机和变压器等设备都会产生可观的电磁辐射。船用电机和变压器的电磁辐射实验研究表明,船舶电磁辐射会透射到海水中去,表 8.7-1、表 8.7-2 为工频谐波实地测量结果。图 8.7-3 为 115kVA 交流发电机幅值波谱,图 8.7-4 为 4.5kVA 交流电动机幅值波谱。

表 8.7-1 工频谐波实地测量结果					
频率 (Hz)	50	100	150	200	250
输出 (mV)	1500	900	380	150	50
输入 (μV)	300	53	27	11.5	3.84
水平场强 ($\mu\text{V}/\text{m}$)	50	8.8	4.5	1.92	0.64

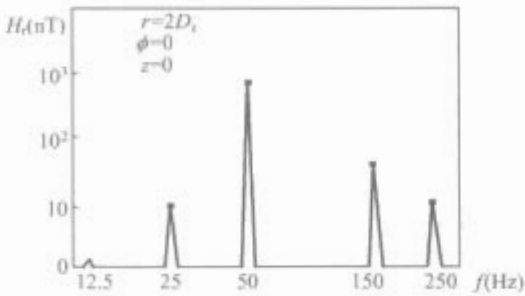


图 8.7-3 115kVA 交流发电机幅值波谱

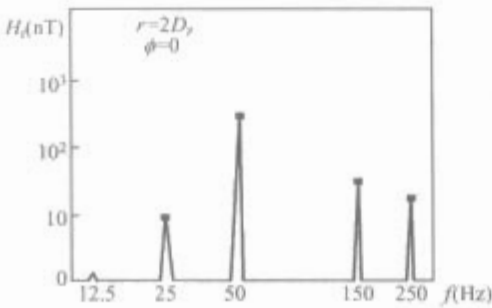


图 8.7-4 4.5kVA 交流电动机幅值波谱

表 8.7-2 工频谐波实地测量结果			
频率 (Hz)	最大水平场强 (dB)	频率 (Hz)	最大水平场强 (dB)
50	72	550	43
100	43.5	600	38
150	58	650	39
200	38	700	37
300	41	800	36
400	42	900	36

1.4 船舶感应电场

船舶在大地磁场中的运动会产生变化的电场。由电磁感

应产生船舶电场的因素有:船体切割地磁场磁力线产生的电动势,船体周围的运动水流切割地磁场磁力线产生的电动势,螺旋桨转动产生的电动势和磁性船体运动引起空间磁通变化产生的电动势。

分别在正西东方向和正南北方向,测量了同一船模运动时的感应电场,船模运动速度为 $1.6\text{m}/\text{s}$ 。图 8.7-5 是船模南北方向运动时的电场,最大电场强度 $7.9\mu\text{V}/\text{m}$,图 8.7-6 是船模由西向东方向运动时的电场,最大电场强度也为 $7.9\mu\text{V}/\text{m}$ 。

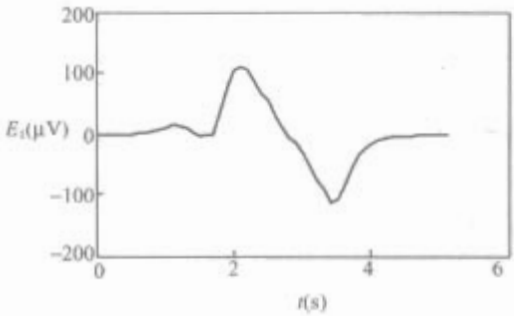


图 8.7-5 船模南北方向运动时的电场

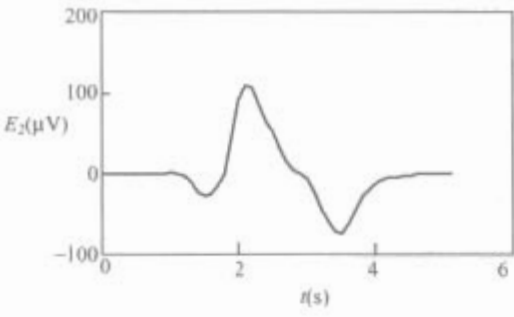


图 8.7-6 船模西东方向运动时的电场

1.5 船舶摩擦电场

摩擦后的带电棒能吸引轻小物体,原因在于带电棒在周围空间产生了一个非均匀电场,离棒的带电端愈近,电场就愈强。如果轻小物体是电介质,那么这些小物体在电场中被极化,离带电棒近的一端出现异性电荷,远端出现同性电荷。这些电荷被束缚在小物体两端,称极化电荷,极化电荷在电场中同样要受到电场力作用。如图 8.7-7 所示,小物体离棒近的一端受的引力为 F_- ,另一端受的斥力为 F_+ ,由于电场不均匀, $F_- > F_+$,小物体所受合力指向带电棒,结果它被带电棒吸引过去了。

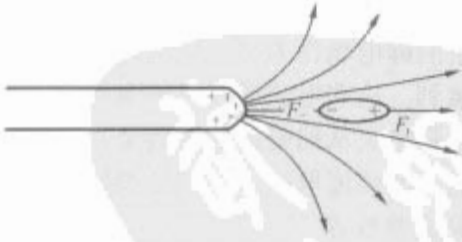


图 8.7-7 摩擦产生的电场

如果小物体为导体,这样的小导体在带电棒的电场中被感应,结果靠近带电棒的一端,感应电荷与棒上电荷异号,远离带电棒的一端感应电荷与棒上电荷同号。于是,小物体在非均匀电场中受力作用,其情况与电介质受力类似,也将趋向带电棒。其实,在非均匀电场中的轻小物体,在电场的作用下,都可看作一个小的电偶极子,这些小的电偶极子,在非均匀电场中,沿电场强度方向取向,受力作用而趋向于电场变化大的地方,结果被带电棒吸引。

船体和海水之间以及尾流气泡浮起时摩擦会产生电场。

1.6 船舶尾流电场

无论是潜艇还是水面船舶航行时都会留下数十公里长的尾流航迹，作为导体的海水在地磁场中运动，毫无疑问就会感生电磁场，只要知道尾流的流场分布，原则上是可以根据海水中的电磁理论计算出来的。但尾流的流场分布本身就是一个理论难题。

实际的船舶航行尾流特性是非常复杂的，尾流形态、速度分布、温度分布和盐度等都难以用简单函数表示。这里也只能用近似方法提出一个尾流的速度模式，如图 8.7-8 所示，Z 轴垂直向下。地磁只考虑 Z 分量。海水分成三个区域，1 区为尾流区，2 区为海水，3 区为海底。尾流区宽度为 a ，深度为 h_1 ，海水深度为 h_2 ，海水和海底的电导率分别为 σ_1 和 σ_3 ，根据实际情况，以不动的海水为参照系，尾流的中心部分是向船后方向运动的，两边的海水是沿船前进方向运动的，尾流的流速随距离作指数衰减。尾流的形态可以由速度的空间函数中的系数和参数决定。设尾流只有 Y 轴分量 v_y ，可以计算出每一区域的电场。

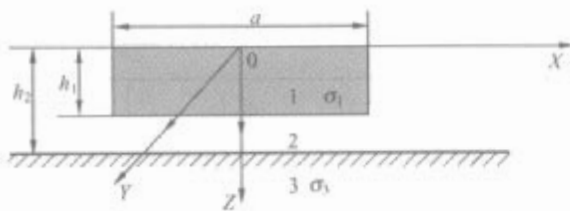


图 8.7-8 尾流的速度模式

作为一个例子，选取一组具体参数为： $a=40\text{m}$ ， $h_1=10\text{m}$ ， $h_2=20\text{m}$ ， $v_0=20\text{ms}^{-1}$ ， $B_{0Z}=10^{-5}\text{T}$ ；海底的介质参数取： $\sigma^{(3)}=0.1(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$ ， $\epsilon_r^{(3)}=10$ ，并取 $\omega=20\pi$ 。图 8.7-9 给出水深 10m 处的场强计算结果。

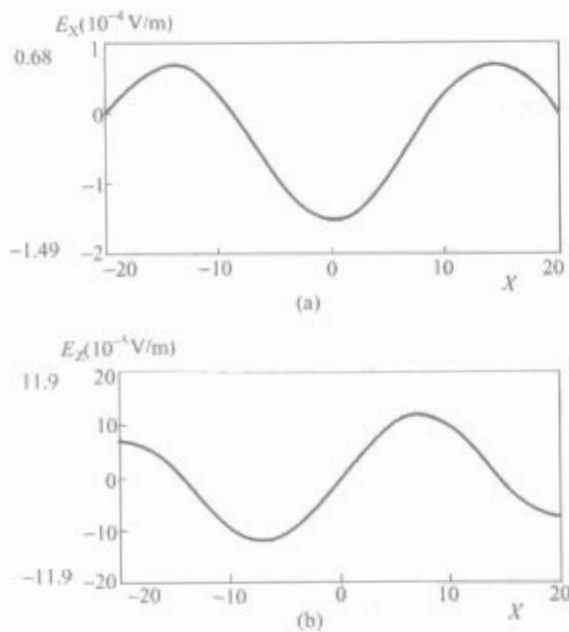


图 8.7-9 水深 10m 处场强计算结果
(a) 水深 10m 处 E_x 计算结果；
(b) 水深 10m 处 E_z 计算结果

理论计算的量级用现有的一般测量技术足以探测到，尾流与船舶的航速和排水量有关，只要船舶航行，尾流的电磁场就将是无法隐去的目标特征。

2 船舶电场计算

(1) 船舶电场主要是由腐蚀与防腐等因素产生的，因此

计算船舶电场的目的主要是优化船舶防腐系统的设计，使全船处于合理的保护电位，避免过保护和欠保护。同时，由于船舶电场与声场、磁场、水压场等其他船舶物理场一样能被传感器探测到，因此控制船舶水下电场就成为避免战时被敌方探测、跟踪并摧毁的有效手段。

(2) 测量并计算敌方船舶电场可以对敌方船舶进行跟踪定位，从而为电场水雷引信选择爆炸时机提供信息。因此船舶电场的计算不仅具有优化防腐的意义，而且具有重要的军事意义。

(3) 船舶电场的分布仍然满足拉普拉斯方程或泊松方程，因此理论上可用求解微分方程边值问题的所有方法进行求解，但由于求解场域为无穷大，因此一般采用边界元方法或等效源方法来计算船舶电场。船舶电场的计算中所涉及的基本知识为电磁学基本方程及其求解，海水中电磁波的传播特性及海水的电导率、介电常数、磁导率等电磁参数。

2.1 海水的电磁参数

(1) 海水是一个复杂的多成分体系，其中不仅溶有数量很大、种类繁多的盐类，还溶有各种有机物质、悬浮颗粒和溶解气体。海水中的各种元素是以多种形式存在的，以离子形态存在的占绝大多数。其中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 八种离子占海水中溶质总量的 99% 以上，是海水的主要离子，表 8.7-3 是盐度为 35‰ 海水中主要离子组成表。

表 8.7-3 海水中主要离子组成表

离子	含量 (g/kg 海水)	离子	含量 (g/kg 海水)
Cl^-	19.354	CO_3^{2-} (总量)	0.004 5
SO_4^{2-}	2.712	Na^+	10.77
Br^-	0.067 3	Mg^{2+}	1.290
F^-	0.001 3	Ca^{2+}	0.412 1
HCO_3^-	0.142	K^+	0.399

(2) 海水是一种良导体，其基本的电磁参数有：电导率 σ ，相对磁导率 μ_r 和相对介电常数 ϵ_r 。显然，这些参数与海水溶液的组成是直接相关的，所以它们都是海水温度、盐度和电磁频率等变量的函数。海水的温度、盐度和密度在一定的海区是随深度变化的，在热带、温带和寒带其变化特点是不同的，如图 8.7-10 所示。其中以盐度的变化最为复杂，而温度的变化趋势和密度的相反。这三个参数在各水层中的变化有显著的不同：上层（深度小于 1000m）变化最大；在深度 1000~2000m 的水层中，变化已不明显；在深于 4000m 的水层中，各个气候带的变化规律基本上一致。

2.1.1 电导率

根据海水的组成可知，海水是一种混合多种成分的电解液，电解液的导电机理与通常的金属导体的导电机理大为不同，前者是离子导电，后者是电子导电，离子的体积和质量比电子的大得多，因此，海水导电性质总是与溶质的组成和性质相关。

通常用电阻率 ρ 表示材料导电性质，电阻率 ρ 越小，表示材料导电性能越好，取 $\sigma=1/\rho$ ，称为材料（溶液）的电导率，单位为 $(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$ ， σ 的大小就反映了材料（溶液）

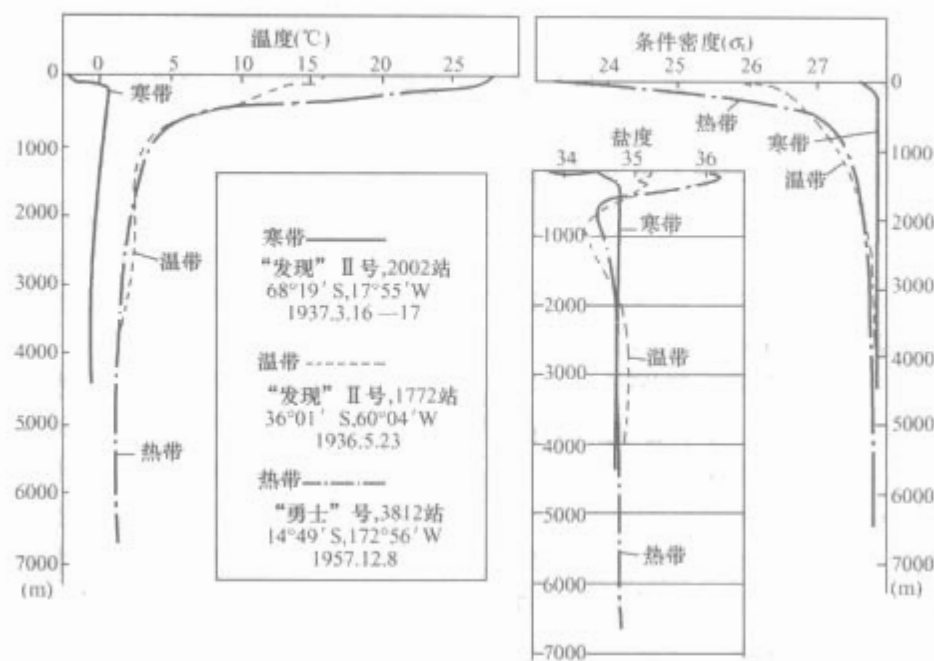


图 8.7-10 温度、盐度和密度随海水深度变化

导电能力的大小。

影响海水电导率的因素很多，但主要是海水温度、盐度和氯度等。关于海水电导率的研究工作，早在 20 世纪 20 年代起前人已经做过大量理论和实验的工作，得到了很多公认的结果。1978 年国际海洋学常用表及规范联合专家小组 (JPOTS) 提出一个“1978 年实用盐度标度定义” (Practical Salinity Scale)，它根据电导率与盐度的关系，通过测量海水的电导率来确定盐度。1986 年三个加拿大人用这个方法测定了我国东海舟山群岛外 241、295km (150 英里) 左右海水盐度为 34.39‰。

电导率与海水温度和盐度 (氯度) 之间关系的经验公式有多种，下面的是 P. K. Weyl 在 1964 年根据实验数据得出的一个经验公式

$$\log \sigma = 0.57627 + 0.892 \log (\text{Cl } 0.1\%) - 10^{-4} T [88.3 + 55T + 0.0107T^2 - (\text{Cl } 0.1\%)(0.145 - 0.002T + 0.0002T^2)] \quad (8.7-1)$$

式中: $T=25-t(^{\circ}\text{C})$; σ 的单位为 $10 \times (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 。盐度与氯度的关系为

$$S 0.1\% = 1.8065 \text{Cl } 0.1\% \quad (8.7-2)$$

用式 (8.7-1) 计算的结果见表 8.7-4，两组早期的实验结果见表 8.7-5。一般情况下，取海水电导率 $\sigma=4 \sim 5 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ 。

表 8.7-4 电导率与海水温度和盐度之间的关系

盐度 S 0.1%	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)						
	30	25	20	15	10	5	0
10	19.127	17.345	15.628	13.967	12.361	10.816	9.341
20	35.458	32.188	29.027	25.967	23.010	20.166	17.456
30	50.856	46.213	41.713	37.351	33.137	29.090	25.238
32	53.859	48.951	44.192	39.579	35.122	30.843	26.771
34	56.840	51.671	46.656	41.794	37.096	32.588	28.298
35	58.323	53.025	47.882	42.896	38.080	33.457	29.060
36	59.801	54.374	49.105	43.996	39.061	34.325	29.820
38	62.743	57.061	51.541	46.187	41.016	36.055	31.337
40	65.667	59.732	53.963	48.367	42.962	37.778	32.851

表 8.7-5 电导率与海水温度和盐度之间关系实验结果

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$10 \times (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$					
	氯度 16.743(Cl 0.1%)		氯度 18.990(Cl 0.1%)		氯度 19.218(Cl 0.1%)	
	Thomas	Reeburgh	Thomas	Reeburgh	Thomas	Reeburgh
25	46.575	46.572	52.128	52.113	52.671	52.670
15	37.673	37.639	42.155	42.141	42.602	42.594
5	29.348	29.318	32.898	32.852	33.258	33.208
0	25.438	25.431	28.492	28.519	28.868	28.829

2.1.2 介电常数

在一般的介质中，介电常数表示为 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 。 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 为真空介电常数， ϵ_r 是相对介电常数。由于电磁波的传播速度与介电常数的平方根成反比，所以介电常数越大，电磁波的传播速度就越小，波长也就越短，可见介电常数对电磁波的影响是极大的。

水的相对介电常数一般取 $\epsilon_r = 80$ ，但严格地讲，因频率不同，介电常数有差异。相对介电常数还是温度的函数，海水温度升高时相对介电常数减小。

2.1.3 相对磁导率

物质的磁导率表示为 $\mu = \mu_0 \mu_r$ ， μ_0 为真空中的磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。海水相对磁导率与钢铁材料相比小得多，一般取 $\mu_r = 1$ 。

2.2 边界元方法计算船舶电场

(1) 船舶的水下部分由若干种不同的金属材料制成，主要有钢质的船壳和铜质的螺旋桨，由于不同的金属浸在海水中会发生水化而产生不同的电极电位，所以水下的船壳和螺旋桨会构成宏观的腐蚀原电池，使得电极电位更负的钢质船壳产生腐蚀。

(2) 钢铁在冶炼过程中混入杂质或添加合金元素，钢铁表面的机械损伤、制造过程中的加工变形和残余应力、表面粗糙度或附着生物等情况不同，均可在钢铁表面形成电位差，因而船壳表面还存在无数腐蚀微电池，使得阳极区遭受腐蚀。

(3) 为了防止宏观和微观腐蚀电池对船体的腐蚀,除了采用涂层防腐外,牺牲阳极阴极保护(SCP)和外加电流阴极保护(ICCP)防腐措施已被广泛采用,而ICCP系统因为体积小、质量轻、寿命长、易更新、能自动调节保护电流和电压、综合费用低等优点,越来越被广泛使用。

(4) 阴极保护系统的广泛采用使得船舶在水下形成了较强的电场,该电场可以被传感器检测到。为了有效地保护船体免遭腐蚀并降低船舶水下电场,必须对阴极保护系统进行优化设计。目前普遍采用边界元方法来进行优化设计,以评估腐蚀保护水平和船舶水下电场。

2.2.1 边界元方法的原理

海水是一种导电媒质,在船舶水下电场的计算中,电位 φ 满足如下边值问题:

1) 在海水中: $\sigma \nabla^2 \varphi = 0$ (σ 为海水的电导率)。

2) 在油漆完好的船壳表面: $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ 。

3) 在第 k 个阳极表面: $-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = J_{ak}$ (J_{ak} 为第 k 个阳极表面的电流密度)。

4) 在第 l 个阴极表面: $-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial n} = J_{cl}$ (J_{cl} 为第 l 个阴极表面的电流密度)。

5) 在水下部分船壳表面: $\oint \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS = 0$ 。

6) 无穷远处: $\oint \varphi = 0$ 。

利用加权余量法通过基本解(作权函数)可建立电场的边界积分方程,该边界积分方程经离散可得代数方程组

$$H\Phi = GJ \quad (8.7-3)$$

式中: Φ 为 N 个单元的电位矩阵; J 为 N 个单元的电流密度矩阵; H 和 G 是它们的系数矩阵。

不论是阳极表面还是阴极表面,在与海水接触后都会产生极化,极化的结果就是在金属电极表面形成了阻抗,以阻止电流的流动。该极化过程可写作

$$J_a = f_a(\varphi_a) \quad (8.7-4)$$

$$J_c = f_c(\varphi_c) \quad (8.7-5)$$

式中: J_a 、 J_c 分别是阳极表面和阴极表面的电流密度; φ_a 、 φ_c 分别是阳极表面和阴极表面的电位; f_a 、 f_c 则分别表示阳极表面和阴极表面的极化函数。

实际上, f_a 和 f_c 与化学和海洋环境等诸多因素有关,它们可以通过查相应金属的极化曲线获得。

式(8.7-4)和式(8.7-5)可耦合进式(8.7-3),再将所有已知量移到方程组右端,未知量移到左端,得到代数方程组

$$AX = F \quad (8.7-6)$$

解此代数方程组,就得到船舶的电位分布。

2.2.2 边界元方法的实施

利用边界元方法计算船舶水下电场时的主要步骤如下:

(1) 模型准备。描述问题的几何形状、确定环境条件并收集合适的极化数据。

(2) 数字仿真。这一步骤主要是编制计算程序,利用计算机进行计算。

(3) 后处理。显示和评估计算结果。

下面的例子是计算一艘货船的电场。

货船长140m,其ICCP系统有4个阳极,并通过2个分布式的电源供电。货船装有2个镍铝铜(NAB)合金制成的螺旋桨,2个钢制的方向舵。货船水下部分沿龙骨线对称,因此仅需对水下部分船壳表面的一半进行单元剖分,如图8.7-11所示。其中螺旋桨用表面积相当的圆盘等效替代,大多数单元是9节点的四边形单元,少部分使用了6节点的三角形单元,最后共剖分1183个单元,节点数为6876。

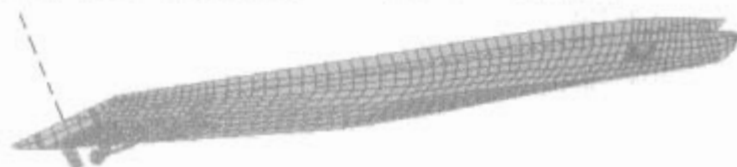


图 8.7-11 船舶的边界元模型

由于螺旋桨运动造成的扰动,方向舵、螺旋桨和轴都被认为没有涂层保护。对于船壳表面,涂层受到损坏的区域被认为没有涂层保护,而涂层完好的区域则认为与海水绝缘。计算中假定海水的电导率为常数5S/m,电极的极化使用了与环境相适应的动态极化曲线。

图8.7-12所示为船体的保护电位,基本上在浸水面上,船体都得到了外加电流阴极保护系统有效的防腐蚀保护。图8.7-13为螺旋桨附近保护电位的详图。图8.7-14表示船体表面在水线下3m处的保护电位曲线。图8.7-15所示为龙骨线上的电位曲线。其中一些部位存在过保护或欠保护的现象,可通过调整阳极电流使之达到最好的保护等级。图8.7-16所示为该货船的水下电动势分布。

2.3 等效源方法计算船舶电场

2.3.1 等效源方法的原理

由于在一定的区域范围内,海水和海床可看作线性媒质,因此船舶的腐蚀与防腐电流在海水中产生的电场就可以用一系列位于该船舶水下部分所占区域内的电偶极子产生的电场的叠加来等效。只要电偶极子的个数足够多,电偶极子阵列布置合理,这种等效可以达到很高的精度。从工程应用考虑,只要误差在允许范围之内,电偶极子个数也不必太多。一般将深海区域等效为空气-海水两层模型,浅海区域则等效为空气-海水-海床三层模型。

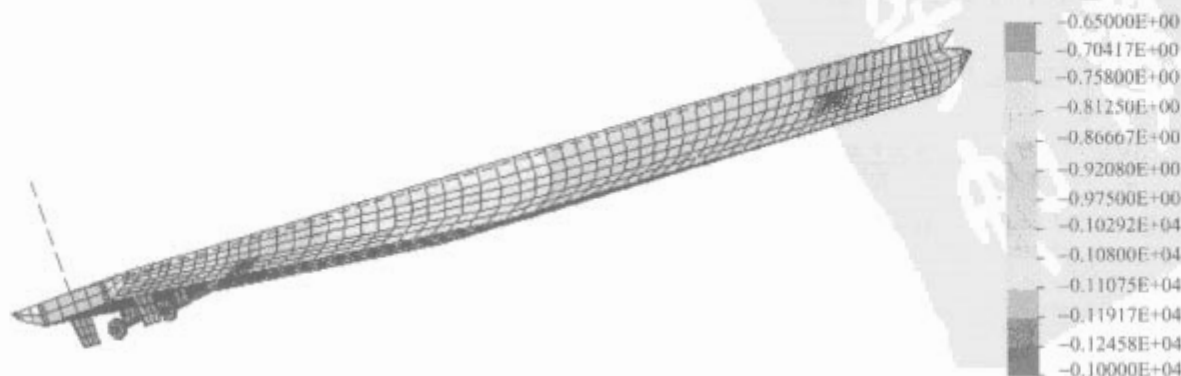


图 8.7-12 船体的保护电位

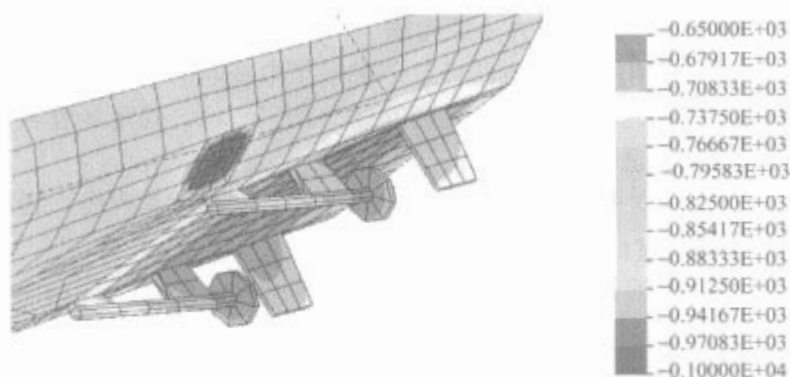


图 8.7-13 螺旋桨附近保护电位

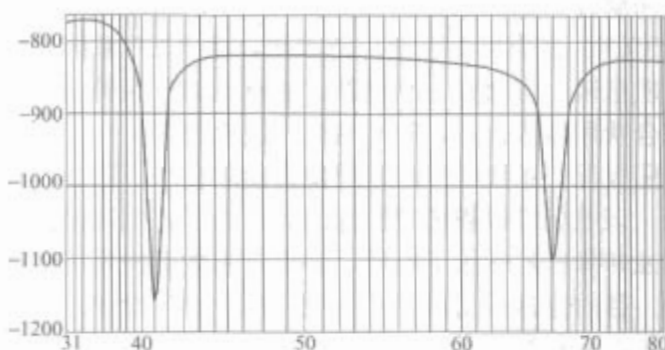


图 8.7-14 船体表面在水线下 3m 处的保护电位曲线

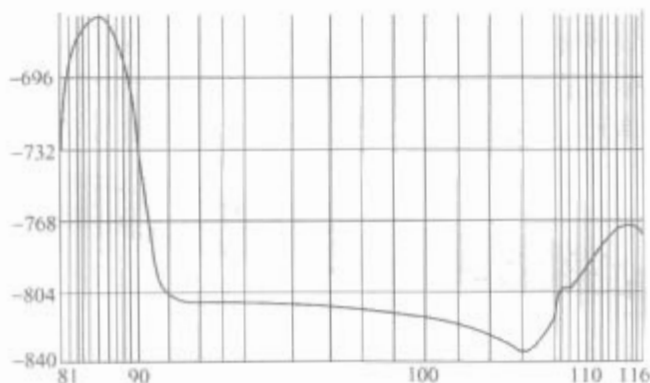


图 8.7-15 龙骨线上的电位曲线

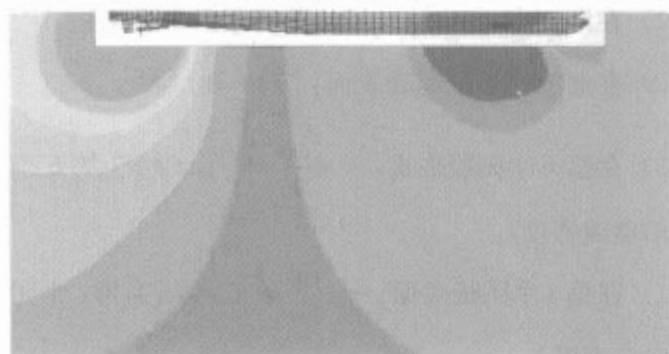


图 8.7-16 货船的水下电动势分布

2.3.2 空气-海水两层模型中直流电流源在海水中产生的电场

在磁导率为 μ 、电导率为 σ 、介电系数为 ϵ 的线性、各向同性的均匀媒质中,静态电磁场的矢量磁位满足方程

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_s \quad (8.7-7)$$

式中: \mathbf{J}_s 为外源的电流密度。结合边界条件解出矢量磁位后,即可求得对应的电磁场

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla (\nabla \times \mathbf{A}) \quad (8.7-8)$$

分 2 种情况给出两层模型中直流电流元在海水中产生的电场:

(1) 垂直电流元位于海水中,方向指向 z 轴正向,如图 8.7-17 所示

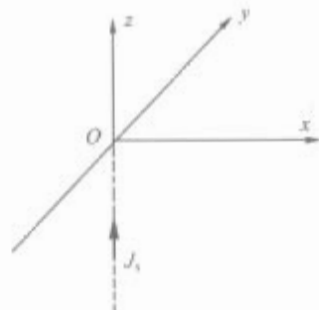


图 8.7-17 海水中的垂直直流电流元

$$\begin{aligned} E_{2x} &= \frac{3Vx}{\sigma_2} \left[\frac{(z-z')}{R_1^5} - \frac{(z+z')}{R_2^5} \right] \\ E_{2y} &= \frac{3Vy}{\sigma_2} \left[\frac{(z-z')}{R_1^5} - \frac{(z+z')}{R_2^5} \right] \\ E_{2z} &= \frac{V}{\sigma_2} \left[\frac{3(z-z')^2 - R_1^2}{R_1^5} - \frac{3(z+z')^2 - R_2^2}{R_2^5} \right] \end{aligned} \quad (8.7-9)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } V &= \frac{I \Delta l}{4\pi}, R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-z')^2}, \\ R_2 &= \sqrt{x^2 + y^2 + (z+z')^2}. \end{aligned}$$

(2) 水平电流元位于海水中,方向为 x 轴正向,如图 8.7-18 所示

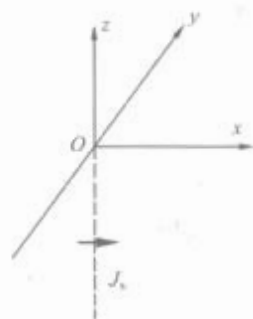


图 8.7-18 海水中的水平直流电流元

$$\begin{aligned} E_{2r} &= \frac{V}{\sigma_2} \left[\frac{3x^2 - R_1^2}{R_1^5} + \frac{3x^2 - R_2^2}{R_2^5} \right] \\ E_{2y} &= \frac{3Vxy}{\sigma_2} \left[\frac{1}{R_1^5} + \frac{1}{R_2^5} \right] \\ E_{2z} &= \frac{3Vxz}{\sigma_2} \left[\frac{z-z'}{R_1^5} + \frac{z+z'}{R_2^5} \right] \end{aligned} \quad (8.7-10)$$

2.3.3 两层模型中交流电流元在海水中产生的电场

(1) 垂直电流元位于海水中,方向指向 z 轴正向

$$\begin{aligned} E_{2r} &= \frac{-i\omega M}{4\pi k_2^2} \int_0^\infty \left[\frac{z-z_0}{|z-z_0|} e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} - b e^{-\tilde{h}_2 (z+z_0)} \right] \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda \\ E_{2\phi} &= 0 \\ E_{2z} &= \frac{\omega M}{4\pi k_2^2} \int_0^\infty \frac{J_0(\lambda r)}{h_2} \left[e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + b e^{-\tilde{h}_2 (z+z_0)} \right] \lambda^3 d\lambda \end{aligned} \quad (8.7-11)$$

式中: $k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, $k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon (1 + i\sigma/a\epsilon)}$,

$$h_2 = \sqrt{k_2^2 - \lambda^2}, M = -\mu_0 I \Delta l, a = \frac{h_2 - h_1}{h_2 + h_1},$$

$$b = \frac{k_1^2 h_2 - k_2^2 h_1}{k_1^2 h_2 + k_2^2 h_1}, c = \frac{2h_2}{h_2 + h_1}, d = \frac{2k_1 k_2 h_2}{k_1^2 h_2 + k_2^2 h_1}.$$

(2) 水平电流元位于海水中,方向为 x 轴正向

$$\begin{aligned}
E_{2r} &= \frac{-\omega\mu_0 I \Delta \cos\varphi}{4\pi k_z^2} \int_0^\infty \left\{ \left[k_z^2 J_0(\lambda r) - \frac{\lambda^2}{2} (J_0(\lambda r) - J_2(\lambda r)) \right] \frac{e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|}}{h_2} + \left[\frac{k_z^2 a}{2h_2} (J_0(\lambda r) + J_2(\lambda r)) - \frac{h_2 b}{2} (J_0(\lambda r) - J_2(\lambda r)) \right] e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right\} \lambda d\lambda \\
E_{2\varphi} &= \frac{-\omega\mu_0 I \Delta \sin\varphi}{4\pi k_z^2} \int_0^\infty \left\{ \left[k_z^2 J_0(\lambda r) - \frac{\lambda^2}{2} (J_0(\lambda r) + J_2(\lambda r)) \right] \frac{e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|}}{h_2} + \left[\frac{k_z^2 a}{2h_2} (J_0(\lambda r) - J_2(\lambda r)) - \frac{h_2 b}{2} (J_0(\lambda r) + J_2(\lambda r)) \right] e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right\} \lambda d\lambda \\
E_{2z} &= \frac{i\omega\mu_0 I \Delta \cos\varphi}{4\pi k_z^2} \int_0^\infty \left[\frac{z-z_0}{|z-z_0|} e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + b e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right] \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda
\end{aligned} \quad (8.7-12)$$

2.3.4 空气-海水-海床三层模型中直流电流元在海水中产生的电场

(1) 垂直电流元位于海水中, 方向指向 z 轴正向

$$\begin{aligned}
E_{2x} &= \frac{-3Mx}{4\pi\mu_0\sigma_2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} K_1^n K_2^n \left(\frac{K_1 K_2 z_8}{R_8^5} + \frac{K_1 K_2 z_7}{R_7^5} - \frac{K_1 z_9}{R_9^5} - \frac{K_2 z_6}{R_6^5} \right) + \frac{z_1}{R_1^5} \right] \\
E_{2y} &= \frac{-3My}{4\pi\mu_0\sigma_2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} K_1^n K_2^n \left(\frac{K_1 K_2 z_8}{R_8^5} + \frac{K_1 K_2 z_7}{R_7^5} - \frac{K_1 z_9}{R_9^5} - \frac{K_2 z_6}{R_6^5} \right) + \frac{z_1}{R_1^5} \right] \\
E_{2z} &= \frac{-M}{4\pi\mu_0\sigma_2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} K_1^n K_2^n \left(\frac{K_1 K_2 (3z_8^2 - R_8^2)}{R_8^5} + \frac{K_1 K_2 (3z_7^2 - R_7^2)}{R_7^5} - \frac{K_1 (3z_9^2 - R_9^2)}{R_9^5} - \frac{K_2 (3z_6^2 - R_6^2)}{R_6^5} \right) + \frac{3z_1^2 - R_1^2}{R_1^5} \right]
\end{aligned} \quad (8.7-13)$$

式中: $z_1 = z - z'$, $z_6 = z + z' + 2(n+1)D$, $z_7 = z - z' - 2(n+1)D$, $z_8 = z - z' + 2(n+1)D$, $z_9 = z + z' - 2nD$, $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + z_1^2}$, $R_6 = \sqrt{x^2 + y^2 + z_6^2}$, $R_7 = \sqrt{x^2 + y^2 + z_7^2}$, $R_8 = \sqrt{x^2 + y^2 + z_8^2}$, $R_9 = \sqrt{x^2 + y^2 + z_9^2}$, $K_1 = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\sigma_2 + \sigma_1)$, $K_2 = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_2 + \sigma_3)$, D 为海水深度。

(2) 水平电流元位于海水中, 方向为 x 轴正向

$$\begin{aligned}
E_{2x} &= \frac{M}{4\pi\mu_0\sigma_2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} K_1^n K_2^n \left(\frac{K_1 K_2 (R_8^2 - 3x^2)}{R_8^5} + \frac{K_1 K_2 (R_7^2 - 3x^2)}{R_7^5} + \frac{K_1 (R_9^2 - 3x^2)}{R_9^5} + \frac{K_2 (R_6^2 - 3x^2)}{R_6^5} \right) + \frac{R_1^2 - 3x^2}{R_1^5} \right] \\
E_{2y} &= \frac{-3Mxy}{4\pi\mu_0\sigma_2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} K_1^n K_2^n \left(\frac{K_1 K_2}{R_8^5} + \frac{K_1 K_2}{R_7^5} + \frac{K_1}{R_9^5} + \frac{K_2}{R_6^5} \right) + \frac{1}{R_1^5} \right] \\
E_{2z} &= \frac{-3Mx}{4\pi\mu_0\sigma_2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} K_1^n K_2^n \left(\frac{K_1 K_2 z_8}{R_8^5} + \frac{K_1 K_2 z_7}{R_7^5} + \frac{K_1 z_9}{R_9^5} + \frac{K_2 z_6}{R_6^5} \right) + \frac{z_1}{R_1^5} \right]
\end{aligned} \quad (8.7-14)$$

2.3.5 三层模型中交流电流元产生的电磁场

(1) 垂直电流元位于海水中, 方向指向 z 轴正向

$$\begin{aligned}
E_{2r} &= \frac{i\omega\mu_0 I \Delta}{4\pi k_z^2} \int_0^\infty \left[\frac{z-z_0}{|z-z_0|} e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + c_2^+ e^{\tilde{h}_2(z+z_0)} + c_2^- e^{\tilde{h}_2(z-z_0)} - d_2^+ e^{-\tilde{h}_2(z-z_0)} - d_2^- e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right] \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda \\
E_{2\varphi} &= 0 \\
E_{2z} &= \frac{-\omega\mu_0 I \Delta}{4\pi k_z^2} \int_0^\infty \left[e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + c_2^+ e^{\tilde{h}_2(z+z_0)} + c_2^- e^{\tilde{h}_2(z-z_0)} + d_2^+ e^{-\tilde{h}_2(z-z_0)} + d_2^- e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right] \frac{\lambda^3}{h_2} J_0(\lambda r) d\lambda
\end{aligned} \quad (8.7-15)$$

式中: $k_1 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, $k_2 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_2 (1 + i\sigma_2/\omega\epsilon_2)}$, $k_3 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_3 (1 + i\sigma_3/\omega\epsilon_3)}$, $a_2^+ = \frac{f_2(h_1 + h_2)(h_2 - h_3)}{u}$, $a_2^- = \frac{-f_2(h_1 - h_2)(h_2 - h_3)}{u}$, $b_2^+ = a_2^-$, $b_2^- = \frac{-(h_1 - h_2)(h_2 - h_3)}{u}$, $c_2^+ = \frac{f_2(h_1 k_2^2 + h_2 k_1^2)(h_2 k_3^2 - h_3 k_2^2)}{v}$, $c_2^- = \frac{-f_2(h_1 k_2^2 - h_2 k_1^2)(h_2 k_3^2 - h_3 k_2^2)}{v}$, $d_2^+ = c_2^-$, $d_2^- = \frac{-(h_1 k_2^2 - h_2 k_1^2)(h_2 k_3^2 + h_3 k_2^2)}{v}$, $f_2 = e^{2\tilde{h}_2 D}$, $f_3 = e^{i(h_2 - h_3)D}$, $u = f_2(h_1 - h_2)(h_2 - h_3) + (h_1 + h_2)(h_2 + h_3)$, $v = f_2(h_1 k_2^2 - h_2 k_1^2)(h_2 k_3^2 - h_3 k_2^2) + (h_1 k_2^2 + h_2 k_1^2)(h_2 k_3^2 + h_3 k_2^2)$ 。

(2) 水平电流元位于海水中, 方向为 x 轴正向

$$\begin{aligned}
E_{2r} &= \frac{-\omega\mu_0 I \Delta \cos\varphi}{4\pi k_z^2} \int_0^\infty \left\{ \frac{k_z^2}{h_2 r} \left[e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + a_2^+ e^{\tilde{h}_2(z+z_0)} + a_2^- e^{\tilde{h}_2(z-z_0)} + b_2^+ e^{-\tilde{h}_2(z-z_0)} + b_2^- e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right] J_1(\lambda r) + \right. \\
&\quad \left. h_2 \left[\frac{z-z_0}{|z-z_0|} e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + c_2^+ e^{\tilde{h}_2(z+z_0)} + c_2^- e^{\tilde{h}_2(z-z_0)} - d_2^+ e^{-\tilde{h}_2(z-z_0)} - d_2^- e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right] \frac{\partial J_1(\lambda r)}{\partial r} \right\} d\lambda \\
E_{2\varphi} &= \frac{\omega\mu_0 I \Delta \sin\varphi}{4\pi k_z^2} \int_0^\infty \left\{ \frac{k_z^2}{h_2} \left[e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + a_2^+ e^{\tilde{h}_2(z+z_0)} + a_2^- e^{\tilde{h}_2(z-z_0)} + b_2^+ e^{-\tilde{h}_2(z-z_0)} + b_2^- e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right] \frac{\partial J_1(\lambda r)}{\partial r} + \right. \\
&\quad \left. h_2 \left[\frac{z-z_0}{|z-z_0|} e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + c_2^+ e^{\tilde{h}_2(z+z_0)} + c_2^- e^{\tilde{h}_2(z-z_0)} - d_2^+ e^{-\tilde{h}_2(z-z_0)} - d_2^- e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right] \frac{J_1(\lambda r)}{r} \right\} d\lambda \\
E_{2z} &= \frac{-i\omega\mu_0 I \Delta \cos\varphi}{4\pi k_z^2} \int_0^\infty \left[e^{\tilde{h}_2 |z-z_0|} + c_2^+ e^{\tilde{h}_2(z+z_0)} + c_2^- e^{\tilde{h}_2(z-z_0)} - d_2^+ e^{-\tilde{h}_2(z-z_0)} - d_2^- e^{-\tilde{h}_2(z+z_0)} \right] \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda
\end{aligned} \quad (8.7-16)$$

2.3.6 等效源方法的实施

假设在船舶水下部分区域内坐标为 (u_i, v_i, w_i) 的位置上同时存在 x 方向水平电偶极子、 y 方向水平电偶极子和 z 方向垂直电偶极子, 这样的位置共有 k 个, 那么每个位置上都会有三个方向的电偶极矩 p_{ui}, p_{vi}, p_{wi} , 因此船舶水下电场的电偶极子阵列模型是

$$E_{xi} = \sum_{i=1}^k (a_{xji} p_{ui} + a_{yji} p_{vi} + a_{zji} p_{wi}) \quad (8.7-17)$$

$$E_{yi} = \sum_{i=1}^k (b_{xji} p_{ui} + b_{yji} p_{vi} + b_{zji} p_{wi}) \quad (8.7-18)$$

$$E_{zi} = \sum_{i=1}^k (c_{xji} p_{ui} + c_{yji} p_{vi} + c_{zji} p_{wi}) \quad (8.7-19)$$

式中: $a_{xji}, a_{yji}, a_{zji}, b_{xji}, b_{yji}, b_{zji}, c_{xji}, c_{yji}, c_{zji}$ 为已知空间函数, 由前述两层模型或三层模型的公式可得到它们的表达式。

设测量点数为 N , 每个测量点都有三个电场强度分量, 代入式 (8.7-17)、式 (8.7-18) 和式 (8.7-19), 得到 $3N$ 个方程组成的方程组, 写成矩阵形式为 $E=FM$ 。

只要 $N \geq k$, 则方程组可解。一般 $N > k$, 此时 $E=FM$ 为矛盾方程组, 则 $M=F^+E$, 其中 F^+ 为 F 的广义逆。定义拟合误差为

$$e = \| FM - E \|_2 / \| E \|_2 = \| FF^+ E - E \|_2 / \| E \|_2 \quad (8.7-20)$$

定义测量点 $P_j(x_i, y_i, z_i)$ 处电场三分量的实测值 E_{xj}, E_{yj}, E_{zj} 与模型计算值 $\hat{E}_{xj}, \hat{E}_{yj}, \hat{E}_{zj}$ 的相对偏差为

$$\begin{aligned} e_{Ex}(j) &= |E_{xj} - \hat{E}_{xj}| / \max_{1 \leq j \leq N} \{|E_{xj}|\} \\ e_{Ey}(j) &= |E_{yj} - \hat{E}_{yj}| / \max_{1 \leq j \leq N} \{|E_{yj}|\} \\ e_{Ez}(j) &= |E_{zj} - \hat{E}_{zj}| / \max_{1 \leq j \leq N} \{|E_{zj}|\} \end{aligned} \quad (8.7-21)$$

可通过计算拟合误差了解模型拟合精度情况, 当拟合精度达到要求时, 模型建立成功。下例是用该方法对电场船模水下静电场建模。

利用电场船模和三分量电场测量仪器进行了电场测量。根据实测的其中一组数据对船模水下静电场建模, 所建模型的拟合误差为 4.84%, 测量的 E_x, E_y, E_z 曲线及用模型计算的 E_x, E_y, E_z 曲线分别如图 8.7-19~图 8.7-21 所示。从图中可以看出, 测量数据与模型数据吻合得较好。

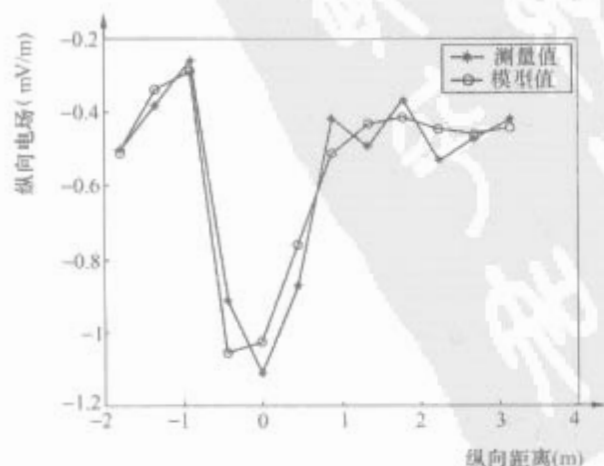


图 8.7-19 测量的 E_x 与用模型计算的 E_x 比较图

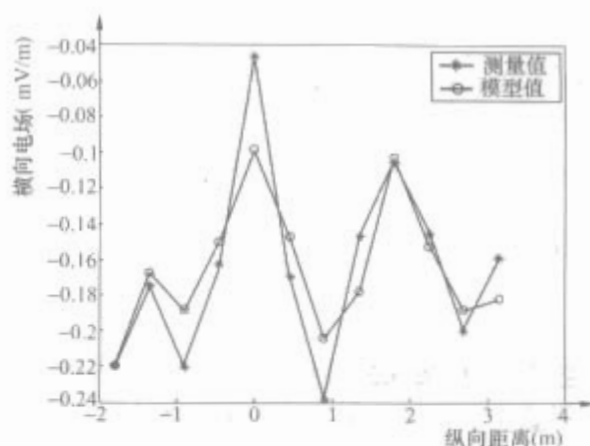


图 8.7-20 测量的 E_y 与用模型计算的 E_y 比较图

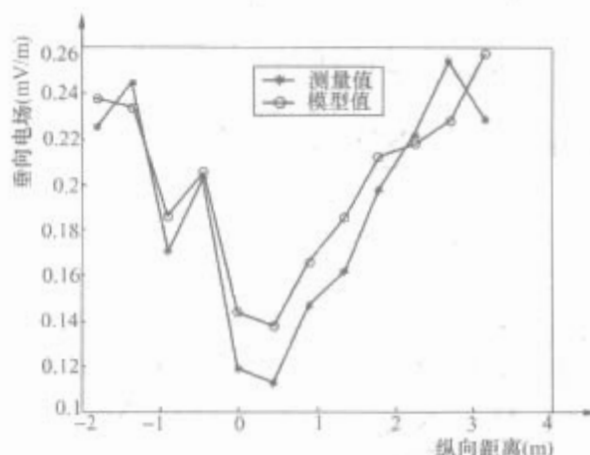


图 8.7-21 测量的 E_z 与用模型计算的 E_z 比较图

3 船舶电场测量

通过在水下布放电场测量传感器, 测量水下各点的电场强度各个分量值, 同时记录各点位置及船舶参数, 从而可以得到水下船舶电场的原始分布数据, 对获得的数据进行必要的处理和分析就可以了解水下船舶电场的分布情况。

3.1 电场测量仪器

3.1.1 船舶电场测量原理

3.1.1.1 电场测量原理

均匀无限大电场的场强测量可以通过沿场强方向, 测量相距为 L 两点之间的电位差 ΔU_d , 由公式 $E = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} - \frac{\Delta U_d}{\Delta L}$ 得到船舶水下电场场强。实际工作中均匀电场是通过平行板电容产生的, 如果平行板足够长, 并且板间距离 $\gg 1\text{m}$, 测量电极位于板的中间位置, 则平行板的边缘效应影响很小 (小于 0.04%), 同时通过采用特殊测量电极, 严格绝缘工艺, 电极本身尺寸对测量结果影响也很小, 可以认为电极测出的电位差就是测量电极所在位置的场强值。

3.1.1.2 电场测量仪器的工作原理

船舶水下电场测量是针对目标在水下电场的信号特征实现对目标探测。这种技术受海洋环境影响小。通过布置水下电场探测传感器基阵, 用以测量水下电场矢量。每个传感器又由 3 个相互正交可以彼此代替的电极构成。这些电极与数据采集和分析中心相连。当船舶通过传感器基阵附近时, 船舶电场干扰海洋环境电场, 在水下传感器读数上产生水下电场信号, 通过前置放大器放大、滤波并按一定的格式传输到接收单元, 通过分析得到船舶水下电场测量位置的电场分布情况。

3.1.2 测量仪器的结构与组成

船舶电场水下测量系统的结构框图如图 8.7-22 所示。

由图 8.7-22 可知, 船舶水下电场测量系统主要由两部

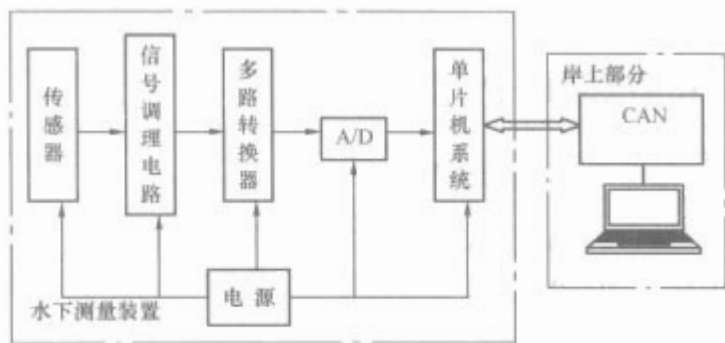


图 8.7-22 水下电场测量系统结构框图

分组成：岸上接收处理部分和水下测量装置，两者之间通过 CAN 传输数据。为了延长电池的使用寿命，在电源板上设置继电器，通过岸上直流电源来控制水下测量体部分电池电源的通断。因此实际使用的是四芯纵向密封海水电缆，两芯传输数据，另两芯控制继电器。岸上接收处理部分包括一台通用 PC 机、CAN 通信卡、一台直流稳压电源；水下测量装置则包括电源电路、传感器及信号调理电路、A/D 转换和单片机系统。

船舶水下电场测量系统工作过程如下：

- (1) 岸上计算机首先初始化 CAN 通信卡，然后等待与单片机进行通信。
- (2) 开直流稳压电源，单片机上电复位和初始化后，请求岸上计算机发送命令，并根据岸上计算机发出的命令进行跳转，设置好波特率并执行相应的子程序。
- (3) 在测量子程序中，单片机控制多路转换器的转换，使得 A/D 对多路信号实行分时采集，单片机则将采集到的数据发送给岸上计算机，岸上计算机将接收到的数据保存在文件中。
- (4) 采集完成后，计算机提示用户关闭直流稳压电源并退出程序。

3.2 船舶水下电场测量实例

在某海域测量了船舶的水下电场，所使用的电场测量系统的实际性能指标如下。

- (1) 分辨率： $1\mu\text{V/m}$ 。
- (2) 信号输入范围： $-30\text{mV}\sim+30\text{mV}$ 。
- (3) 信号频率带宽： $0\sim400\text{Hz}$ 。
- (4) 采样速率：每通道 $200\sim600\text{Hz}$ ，可用软件调节。
- (5) 传输距离： $0\sim1300\text{m}$ 。
- (6) 供电电压： $4.5\sim6.5\text{V}$ 。
- (7) 工作电流： 100mA （测量时）。

3.3 电场测量实例结果分析

3.3.1 基本分析方法

船舶电场测量的背景结果中包含有电极对的固有电动势差。首先要将固有电动势差减去，由于存在 50Hz 工频干扰，要对电场测量数据进行 $45\sim55\text{Hz}$ 的带通滤波，然后对电场的测量数据进行 FFT 变换，分析电场信号的频率特性，对于船舶电场信号而言，其轴频信号比较微弱，需要用正交小波——Daubechies 小波对船舶电场三分量进行 5 个尺度的小波分解。通过分析得到电场信号特征。

3.3.2 电场测量结果分析及结论

3.3.2.1 时域分析

图 8.7-23 给出了船舶船尾正下方（螺旋桨下）电场 X、Y、Z 三个分量的时域波形。

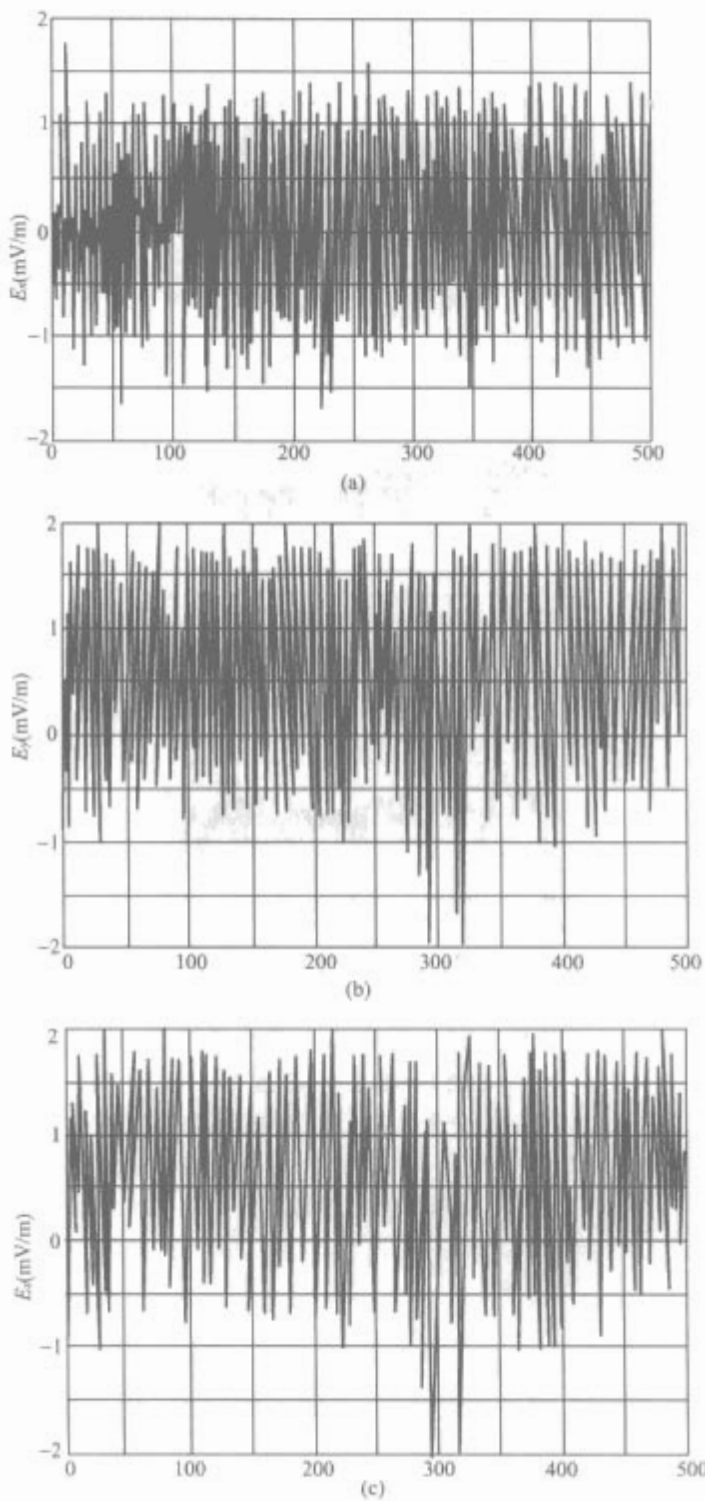


图 8.7-23 船舶船尾正下方电场时域波形
(a) 电场 E_x 分量；(b) 电场 E_y 分量；
(c) 电场 E_z 分量

3.3.2.2 频域分析

图 8.7-24 为距船舶船尾（螺旋桨后） 1m 处电场频率幅度曲线。

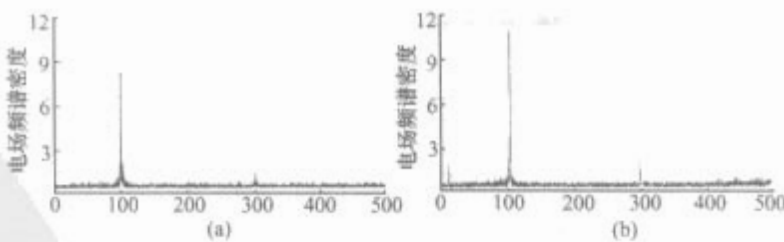


图 8.7-24 距船舶船尾 1m 处电场频率幅度曲线
(a) 电场 E_x 分量幅频曲线；(b) 电场 E_z 分量幅频曲线

3.3.2.3 小波分析

使用比较常用的紧支正交小波——Daubechies 小波对船舶电场三分量进行 5 个尺度的小波分解。电场三分量在尺度 5 上的近似信号 a_5 波形如图 8.7-25 所示，图中纵轴单位为 mV/m 。

图 8.7-26 为对电场三分量在尺度 5 上近似波形所作的

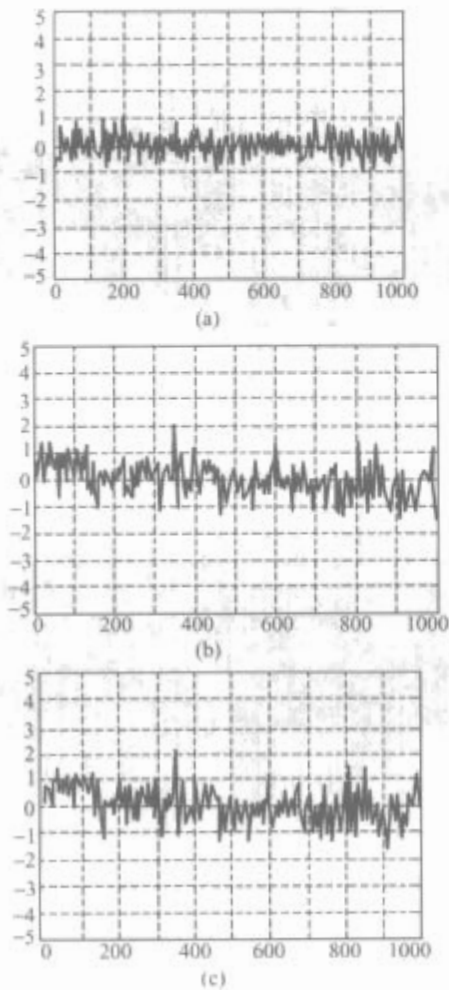


图 8.7-25 电场三分量在尺度 5 上的近似信号 a5 波形
(a) 电场 E_x 分量尺度 5 近似波形; (b) 电场 E_y 分量尺度 5 近似波形; (c) 电场 E_z 分量尺度 5 近似波形

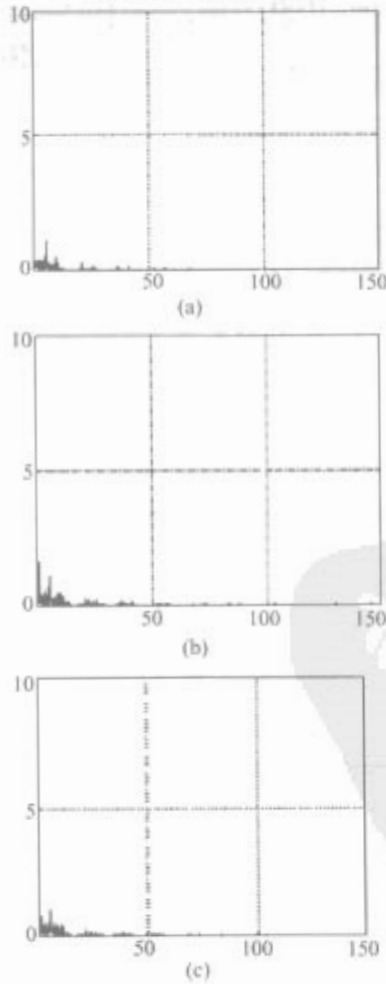


图 8.7-26 对电场三分量在尺度 5 上近似波形所作的常规 FFT
(a) 电场 E_x 分量尺度 5 近似波形频谱; (b) 电场 E_y 分量尺度 5 近似波形频谱; (c) 电场 E_z 分量尺度 5 近似波形频谱

常规 FFT。

4 船舶电场防护

4.1 船舶电场防护原理

船舶的电场防护主要针对电化学成因的船舶电场，并少量的涉及感应电场。船舶电场防护主要包括主动防护和被动防护两种。

4.1.1 被动防护原理

船舶电场被动防护主要通过一些结构和工艺措施来降低船舶电场。

4.1.1.1 采用非金属材料并根据电动势选择金属材料

使用不导电的材料制造海水环绕的船体水下部分的壳体、船体结构、系统和装置或选用电极电动势最接近的金属。使用不导电的材料制造海水环绕的零件和装置，就排除了电化学成因的电场并取消了对这些零件和装置采用专门的电防护设备的必要性；使用不导电的材料制造船舶的壳体实际上就完全消除了感应成因的电场。

用来替代金属的不导电的材料应该是不吸水的，并且在船舶使用的全寿命周期内应该保持不导电性。

按电极电动势合理的选择金属，能减小船舶的电场，大大减轻电防护设备的设计、制造和使用成本。各主要造船材料的电极电动势如表 8.7-6 所示（根据正常的氢参比电极电动势相比给出的固定电极电动势值），其他参比电极与氢参比电极的电动势如表 8.7-7 所示。

表 8.7-6 主要造船材料的固定电极电动势的平均值 U 和均方差 $\delta(U)$

金属材料	$U(V)$	$\delta(U)$ (V)
低合金钢	-0.35	0.03
高锰钢	-0.40	0.03
高铬钢	0.10	0.08
黄铜	-0.05	0.03
青铜	0.05	0.03
铜合金	0.05	0.03
铝镁合金	-0.05	0.08
铝镁锌合金	-0.65	0.05
钛合金	0.20	0.10
防护用镁锌合金	-0.70	0.02
镁合金	-1.20	0.02
镀锌层	-0.80	0.02
铅	-0.20	0.04

4.1.1.2 屏蔽电场源

降低阴极保护电流板或者其他强烈电流源形成的船舶电场通常可以使用如下的方法：

- (1) 在排水孔和孔的格栅上安装屏蔽围板，在单个小孔处安装屏蔽短管或者屏蔽元件。
- (2) 使船体-舷侧附近以及循环泵线路的附件远离船舶壳体。
- (3) 将用船体材料制作的屏蔽环安装到管路没有电绝缘部分的分离部件上。
- (4) 屏蔽元件应该使用船体材料制作，并朝向被屏蔽范围的表面，不应该涂覆电绝缘涂层。被屏蔽范围内的孔如果是完全封闭的，封闭这些孔的板使用电绝缘材料制成。

表 8.7-7 其他参比电极相对氢参比电极的电动势

参比电极类型	相对电极电动势 (V)
饱和甘汞电极	0.242
氯化银电极	0.240
常态甘汞电极	0.280
十分之一当量甘汞电极	0.337
硫酸铜电极	0.300

4.1.1.3 分离内部电路

降低船舶电场的主要结构—工艺方法之一，是在船舶上采用电分离部件，即保证各电极的电分离并导致电流系统内部的电阻增大的结构。主要方法包括：

- (1) 在海水环绕的不同种类金属制成的各器件的接触表面之间加上不导电的衬垫。
- (2) 实现船舶各装置和系统的元件与船舶壳体之间的电绝缘。
- (3) 连接船舶设备零件和部件表面并用于电绝缘的材料应具有如下的特性：高的体积电阻系数，低潮湿度，低吸水性，小的水分扩散系数，没有水溶性杂质，电气参数和机械参数各向异性很小，高强度，易加工。

4.1.1.4 电绝缘涂层

在船舶壳体、壳体零件表面涂覆绝缘涂层，能大大减低电化学过程和电磁感应产生的船舶电场。电绝缘涂层能够在保障船舶电防护的同时，也对船舶壳体和船体结构的腐蚀进行防护，而且涂覆在分离部件表面的电绝缘涂层能够提高这些部件的可靠性。

常用的电绝缘涂层包括橡皮、玻璃钢、塑料涂层和油漆，还有专门的声绝缘和防声纳涂层，油漆层的应用最为广泛，一般可以涂在船舶壳体的水下部分，非低噪声螺旋桨的表面，拖曳装置表面以及分布在水下的分离部件区域内的零件表面。

4.1.2 主动防护原理

4.1.2.1 电场补偿的实质

船舶电场补偿是电防护的一种方法，它的基础是在环绕船舶的水介质中形成专门的电场源，用来抵消船舶本身由于电化学反应形成的电场。

4.1.2.2 内部补偿

当内部补偿时，系统场强的补偿要接通到电解偶的电极上，以便使它们形成的电流在内部的电阻上引起与电解偶电动势方向相反的场强。

当在内部电路上的场强降低到和场源的固定电极电动势相等，则电路内的电流还有在它们周围空间里形成的场，

都将等于 0。

只有当电解偶电路里存在某一电阻时，才可以使用内部补偿的方法。内部补偿系统图见图 8.7-27，图中， r 为电极 I、II 之间的内部电阻，M 为直接与电流系统阳极相连接的内部电路电极，O 为直接与电流系统阴极相连接的内部电路电极。

4.1.2.3 外部补偿

在采取外部补偿的方法时，电流的补偿源与专门的

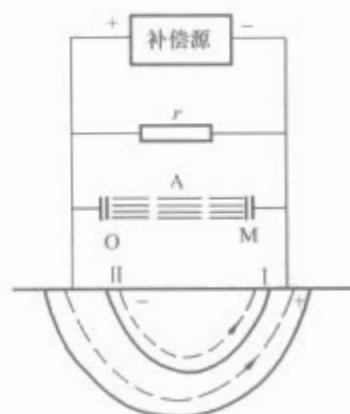


图 8.7-27 内部补偿原理图
——— 电解偶电流线；
----- 补偿电流线

电极（补偿阳极）接通，这些电极以规定的方式布置在舰艇壳体的表面，以及布置在电场源电路电解偶各电极附近。为了排除补偿源的电流通过舰艇结构短路，各阳极与电解偶的各电极要电气分离。要选择电流的方向，以保证其电流产生的电场与电解偶电场在某一距离上要方向相反。使用外部补偿方法时，即使能够准确地计算电解偶形成的电场及补偿阳极形成的电场，也不能获得等于 0 的合成电场，也就是补偿阳极产生的电场不能做到与电解偶电场处处大小相等方向相反。外部补偿系统图原理见图 8.7-28。

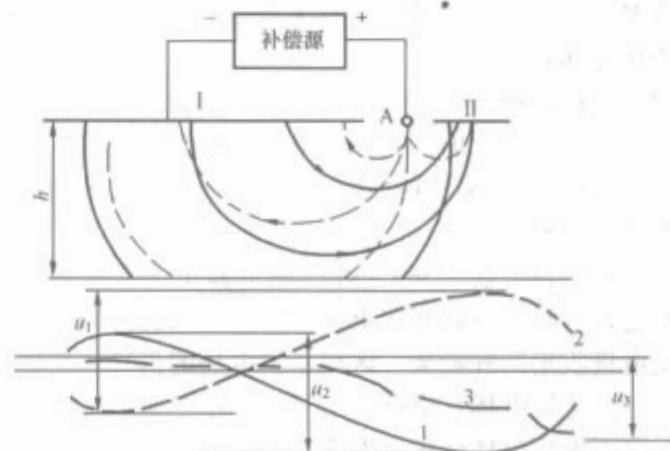


图 8.7-28 外部补偿原理

A—补偿阳极；I、II—舰船电流系统的阳极和阴极；
1—补偿场；2—原始场；3—合成场； u_1 —原始场在 h 深度的电位最大差值； u_2 —补偿场的电位最大差值；
 u_3 —合成场的电位最大差值

4.2 电场防护装置

钢制的船壳和青铜制的螺旋桨在海水中具有不同的电动势，它们之间的电势差通过螺旋桨、大轴、大轴轴承、轴承支架、船体、海水形成电流通路，从而在海水中形成电场。这个电流在船体内部是从螺旋桨通过大轴—轴承及支架，流向船体的，而在海水中则是从船体流向螺旋桨的，因此在海水中形成一个大体从船体指向螺旋桨的电场。如果我们能够在海水中产生一个和该电场大小（近似）相等、方向（近似）相反的电场，那么舰船本身的静电场将得到抵消。如果同时这个反向的电场能够跟随原始电场的波动，那么低频电场也能够得到抵消。电场防护装置的原理如图 8.7-29 所示。

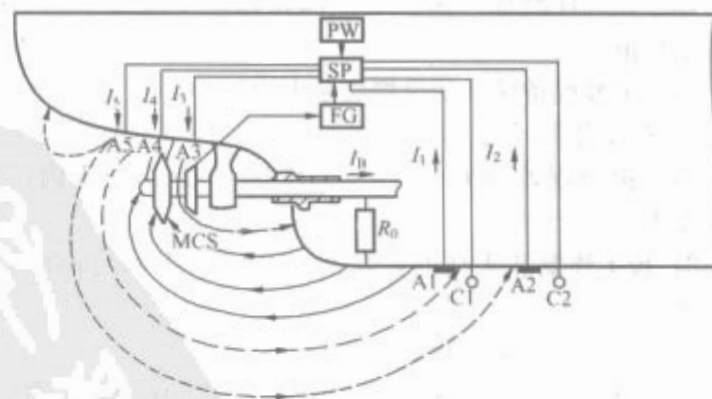


图 8.7-29 电场防护装置原理

——— 初始电流线；----- 补偿电流线

4.2.1 电场防护装置的组成

(1) 磁调制式电流传感器（MCS）。舰船原始电场的电流通路是流经大轴的，大轴电流的大小能够表征舰船本身原始电场大小，因此可以通过测量舰船大轴电流的大小来度量舰船原始电场的大小。MCS 本身和大轴之间是绝缘的。

(2) 函数发生器 (FG)。磁调制式电流传感器虽然能通过测量大轴电流的大小来表征舰船本身的原始电场,但毕竟大轴电流不是电场,它们之间只是存在一个比例或者函数关系,函数发生器 FG 的作用就是将大轴电流的大小转换成原始电场大小的。

(3) 补偿阳极 (A1, A2, A3, A4, A5)。补偿阳极 (又称辅助阳极) 用来产生反向电场来抵消舰船的原始电场,补偿阳极上电流的大小以及补偿阳极的位置对补偿电场的方向和大小具有决定性的作用,因此,补偿阳极电流和补偿阳极的位置对电场隐身的效果具有决定性的作用。补偿阳极本身和船体之间是绝缘的。

(4) 参比电极 (C1, C2)。参比电极是沿船艏、艉方向布置在同一水平面上的。它们用来测量舰船某一特定部位水平方向上的电场大小,并把这个电场大小作为反馈信号送到补偿调节器 (SP)。

(5) 补偿调节器 (SP)。补偿调节器是这个电场隐身系统的核心,它收集磁调制式电流传感器测量的大轴电流信号和参比电极收集的舰船某一区域水平电场的信号,然后计算舰船本身的原始电场,根据“使某一特定平面 (在俄罗斯和乌克兰海军舰用电场防护标准中是 1.5 倍船宽深度处的水平面,在本文中也使用上述规定) 上,舰船电场模值峰峰值最小”的原则,计算需要的补偿电流的大小,并驱动补偿阳极把这些电流发散到海水中。

(6) 电源 (PW)。为系统的各个部件提供能量。

4.2.2 工作制

该系统共有三种工作制:

工作制 I——螺旋桨电流测量工作制。

工作制 II——螺旋桨-船体电解偶电场补偿,以及螺旋桨全面防蚀和船体水下部分局部防蚀工作制。

工作制 III——螺旋桨轴和船体水下部分防蚀工作制。

4.2.3 电场防护技术指标

(1) 全套设备的额定输出参数:

1) 在工作制 II——阳极电流 (16 ± 2.0) A, 输出电压 (25 ± 2.5) V。

2) 在工作制 III——阳极电流 (32 ± 3.0) A, 输出电压 (25 ± 2.5) V。

(2) 在工作制 II, 基本调整误差不超过 3%。

(3) 在工作制 III, 保护电位保持误差不超过 ± 40 mV; 保护电位值待定。

(4) 全套设备保证测量螺旋桨电流:

1) 按工作制 I 工作时, 在 0~1 A、0~2.5 A、0~10 A 范围内, 折合误差不大于 $\pm 3\%$; 在 0~0.25 A 范围内, 折合误差不大于 $\pm 6\%$ 。

2) 按工作制 II 工作时, 在 0~10 A 范围内, 折合误差不大于 $\pm 5\%$ 。

(5) 全套设备保证测量:

1) 轴和船体之间的剩余电压 $U_{\text{残}}$, 在工作制 II, 在 0~0.1 V 范围内, 折合误差不大于 $\pm 3\%$ 。

2) 船体与参比电极之间的电位差, 在工作制 III, 在 0~1 V 范围内, 折合误差不大于 $\pm 3\%$ 。

3) 阳极电流, 在工作制 II, 在 0~20 A 范围内, 在工作制 III, 在 0~50 A 范围内, 折合误差不大于 $\pm 3\%$ 。

(6) 在工作制 II 和 III, 全套设备可对阳极电流进行人工控制, 人工控制可用于对系统进行检查和调整, 或用在自动控制工作制发生故障的情况下。

(7) 全套设备保证用灯光显示电源信号、故障信号和所

采用的工作制。

(8) 全套设备保证在工作制 III, 既能用一舷, 也能用两舷的阳极工作。

(9) 全套设备的电源是由电压 380 V、频率 50 Hz 的三相电网实现的。

(10) 当 $\cos \varphi \geq 0.7$ 时, 每套设备需用的功率不大于 1500 VA。

4.2.4 电场防护装置的可靠性

(1) 舰艇电场防护装置的可靠性是设备的一种性能, 即设备在完成降低电场功能的同时, 在规定的使用技术保养和修理的条件下, 保持规定的使用指标。

(2) 舰艇电场防护设备的可靠性指标分为: 无故障、耐久性、完整性和可维修性。

(3) 由电场防护设备正常使用的时间来确定对无故障的要求。该指标表示设备在必须进行计划技术保养状态之前持续工作的时间。

(4) 电场防护设备的耐久性为系统规定的条件下技术保养和修理, 故障临界状态到来之前, 装置保持自己的电气参数和机械参数的性能。

(5) 设备的完整性为在长期不使用的状态下, 系统部件在完全或者部分油封状态下的保存能力。

(6) 防护装置的可维修性包括: 在航行期间的平均修理时间和在工厂修理的平均时间。

(7) 提高电场防护装置的可靠性的方法主要包括:

1) 使用结构最简单的装置、部件和元件。

2) 保障消除给定源电场的电防护备用措施。

3) 综合使用结构—工艺方法和电场补偿系统。

4) 为分离部件使用水分不易扩散、不易老化、不易失去绝缘性能的材料。

5) 使用标准化和通用结构—工艺设备和电场补偿装置的元件。

6) 为电场补偿各装置准备备用器材和配件。

7) 在电分离部件的表面涂覆点绝缘涂层。

8) 在安装电场防护设备时, 严格按工序检查安装质量。

9) 定期测量舰艇壳体水下部分的电位。

4.3 电场防护设计方法

4.3.1 设计的主要原则

在保持舰艇其他战术技术参数的条件下, 根据保障电防护需要的各参数和保障技术设备可靠性要求的条件下, 设计舰艇的电防护设备。电场防护设备的设计主要包括以下措施:

1) 确定舰艇电场源。

2) 选择电防护设备的类型。

3) 设计电防护的结构和工艺。

4) 选择电场补偿系统, 在舰艇上配置电场防护系统的仪器和元件。

5) 计算剩余电场。

6) 确定舰艇电场源, 应该使用绝缘监测装置监测各电场源的状态, 并在舰艇上布置绝缘监测装置。

7) 评价选定的电场防护设备的可靠性。

8) 编制各种图纸和技术文件。

4.3.2 初步设计阶段电场防护的设计

(1) 编制舰艇主要电场源的清单。

(2) 论证选定的电场防护系统的适用性。

4.3.3 设计阶段电场防护的设计

(1) 为每一个(需要防护的)舰艇电场源确定电防护结构—工艺措施。

(2) 列写电场防护装置使用设备清单。

(3) 计算舰艇的水下电场分布。

(4) 完成电场补偿系统总的电路图。

(5) 完成监测舰艇主要电场源状况的仪器布置和接线图。

4.3.4 施工图纸的设计

(1) 考虑电场防护的要求,设计船体结构、系统和装置的施工图纸。

(2) 完成自动补偿装置部件及自动监测电场源状态仪器的总接线图和定位图。

(3) 编制电源和电防护设备清单。

(4) 编制电场防护系统附属设备的技术任务书。

4.3.5 技术文件编制

(1) 校正电场分布的计算。

(2) 编制电场防护设备的航行试验大纲。

(3) 编制检查电场防护设备的规则和测量舰艇电场的方法和设备的使用说明书。

(4) 编制完工文件。

4.4 电场防护与防腐设备的配合

电化学防护系统的工作对舰艇壳体水下部分的表面电位有影响,因此在设计舰艇的电化学防护和电场防护时,应确保能正确配合。

4.4.1 基本原则

在装备有电场补偿系统的舰艇上,不安装阴极保护和牺牲阳极保护装置。

4.4.2 电场防护与防腐设备合理配合的措施

(1) 和平时期的舰船可以使用可断路的牺牲阳极保护板,战时要拆除。

(2) 对于设计时期没有提出电场防护要求的舰船允许在艏部采用数量有限的短路防蚀板。

(3) 在装备有电场防护装置的舰艇上,在管路里或者与船体一侧相连的附件里布置防蚀板时,防蚀板之间的距离要大于10倍的管路(附件)直径。

(4) 不允许在船艏之间或导流罩上装设环形或其他防蚀板。

(5) 对于耐蚀性不足的电分离部件可以采用满足电场防护要求的防蚀设备。



参 考 文 献

- [1] 肖昌汉. 铁磁学. 北京: 海潮出版社, 1999.
- [2] 周耀忠, 张国友. 舰船磁场分析计算. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [3] 林春生, 龚沈光. 舰船物理场(第2版). 北京: 兵器工业出版社, 2007.
- [4] 郭宽明. CAN 总线原理和应用系统设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1996.
- [5] 侯保荣等. 海洋腐蚀与防护. 北京: 科学出版社, 1997.
- [6] 郑永良, 刘大明, 刘胜道等. 综合消磁中工作线圈临界安匝量的实验研究. 海军工程大学学报, 2006, 18(6): 52~55.
- [7] 唐申生, 周耀忠. 综合消磁过程中工作线圈安匝数的估算方法. 海军工程大学学报, 2002, 14(1): 27~30.
- [8] 王金根, 龚沈光, 刘胜道. 磁性目标的高精度建模方法. 海军工程大学学报, 2001, 13(3): 49~52.
- [9] 王桓. PSO 算法在舰船磁场磁体模拟中的应用. 海军工程大学学报, 2007, 19(1): 105~107.
- [10] 郭成豹, 张晓峰, 肖昌汉等. 采用随机微粒群算法的舰船消磁系统优化调整. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(5): 565~569.
- [11] 周国华, 刘大明. 基于逐步回归的潜艇高空磁场仿真研究. 海军工程大学学报, 2005, 17(5): 82~85.
- [12] 刘大明, 何明, 刘胜道. 基于地磁模式组的消磁电流调整器. 海军工程大学学报, 2001, 13(4): 18~21.
- [13] 肖昌汉, 卢庆芳, 王智勇等. 舰船任意姿态下消磁系统电流变化关系. 海军工程大学学报, 2002, 14(1): 14~18.
- [14] 肖昌汉, 王智勇, 卢庆芳等. 舰船消磁系统 S 矩阵及其测量方法. 海军工程大学学报, 2002, 14(2): 20~24.
- [15] 肖昌汉, 刘胜道, 闫辉. 求解舰船消磁系统 S 矩阵的一种新方法. 海军工程大学学报, 2005, 17(2): 39~42.
- [16] 刘胜道译. 电磁信号的建模与消减. 水雷战与舰船防护, 2000, (1): 48~52.
- [17] 刘胜道, 龚沈光. 并矢格林函数法求解海水中电偶极子电场. 电波科学学报, 2002, 17(4): 373~377.
- [18] 卢新城, 龚沈光, 刘胜道, 孙明. 舰船极低频电场的产生机理及其防护. 海军工程大学学报, 2003, 15(6): 70~74.
- [19] 卢新城, 龚沈光, 周骏, 刘胜道. 深海中极低频时谐垂直电偶极子电磁场的解析解. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(6): 746~749.
- [20] 卢新城, 龚沈光, 孙明, 刘胜道. 轴转动调制腐蚀电流产生的极低频电场的测定. 兵工学报, 2004, 25(5): 544~546.
- [21] 刘胜道, 肖昌汉, 龚沈光. 两层模型中直流电流元产生的电磁场. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(5): 641~644.
- [22] 卢新城, 孙明, 刘胜道, 龚沈光. 舰船轴频电场的实验验证. 中国造船, 2004, 45(4): 60~63.
- [23] 卢新城, 龚沈光, 周骏, 刘胜道. 海水中时谐水平电偶极子的准近场定位. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(3): 331~334.
- [24] 周友援译. 非磁性壳体舰船的交变磁场. 水雷战与舰船防护, 1997, (4): 40~43.
- [25] 汪新宇译. 采用计算机仿真技术进行舰船防腐优化设计. 国外舰船工程, 2005, (4): 44~49.
- [26] B. Froidurot, L. L. Rouvea, A. Foggia, J. P. Bongiraud, G. Meunier. Magnetic discretion of naval propulsion machines. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 24(2), 1190.
- [27] DeGiorgi, V. E., Thomas, E. D. and Luas, K. E., A combined design methodology for impressed current cathodic protection systems, Boundary element technology XI, 1996.
- [28] R. W. P. King, S. S. Sandler, The electromagnetic field of a vertical electric dipole over the earth or sea, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(3), 382.
- [29] S. L. Dvorak, Application of the fast fourier transform to the computation of the Sommerfeld integral for a vertical electric dipole above a half-space, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1992, 40(7), 798.
- [30] K. A. Michalski, Extrapolation methods for Sommerfeld integral trails, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(10), 1405.
- [31] J. M. Chauang, N. G. Zamani, C. C. Hsiung, Some computational aspects of BEM simulation of cathodic protection systems, Applied Math. Modeling, 1987, (11), 371~378.
- [32] Y. Huang, M. Iwata, Z. L. Jin, Numerical analysis of electropotential distribution on the surface of marine structure under cathodic protection(application of three dimensional BEM). J. of the society of naval architects of Japan, vol. 168, 589~562.
- [33] M. Iwata, Y. Huang, Y. Fujimoto, Application of BEM to design of the impressed current cathodic protection system for ship hull. J. of the society of naval architects of Japan, vol. 171, 377~380.
- [34] N. G. Zamani, Boundary element simulation of the cathodic protection system in a prototype ship. Applied mathematics and computation, 1988, 26, 119~123.

第9篇 船舶电磁兼容

主编单位：中国船舶重工集团公司第七〇一研究所

海军工程大学

主 编：侯冬云 宋文武 易学勤 马伟明 赵治华

编写人员：侯冬云(中国船舶重工集团公司第七〇一研究所)

宋文武(中国船舶重工集团公司第七〇一研究所)

易学勤(中国船舶重工集团公司第七〇一研究所)

马伟明(海军工程大学)

赵治华(海军工程大学)

张 炜(中国船舶重工集团公司第七〇一研究所)

汤恒正(中国船舶重工集团公司第七〇一研究所)

胡 安(海军工程大学)

张 磊(海军工程大学)



第 1 章 船舶电磁环境效应

1 概述

1.1 电磁环境

电磁干扰源可分为自然的和人为的。在大多数情况下，自然辐射源的电平远低于人为辐射源的水平。大多数的无意发射占有很宽的频率范围，用一个意义不严格的术语，我们可以把它称为“宽带”发射。而有意发射，例如无线电和电视广播，则称为“窄带”发射，该术语的严格定义是占有单一频率或伴随着边带上几个频率的发射。在电磁干扰测量中所使用的宽带和窄带的严格定义是与接收机带宽和电磁干扰源的脉冲重复频率有关的。

电场强度用 V/m 来度量，另一种度量单位是 dB μ V/m。宽带场强单位是 dB μ V/m/MHz，通常使用在军用标准中，其中 1MHz 参考带宽包括在场强单位里。还有一种单位是 dB μ V/m/kHz，其中 1kHz 是参考带宽。

1.1.1 自然电磁噪声源

- 自然电磁噪声源有：
- (1) 大气噪声——由雷暴时的放电产生。
 - (2) 宇宙噪声——来自宇宙中其他星球。
 - (3) 雷电电磁。
 - (4) 电磁静电电磁辐射。

从时域上看，大气噪声显得很复杂，但它可表征为一些大的尖峰脉冲，其背景为一些随机短脉冲，或为较高连续背景噪声下的一些较小脉冲。

1.1.2 人为电磁噪声

主要的人为电磁噪声源有高频弧焊机、RF 加热器、高频医疗设备、交流高压输电线、点火系统、继电器、开关、荧光灯、微波炉、电力电子变流装置、高频电热设备、电力传动设备、射频发射系统(如电子战、强电磁脉冲及高速数字电路等)。

1.2 典型电磁环境电平

1.2.1 氩弧焊机

RF 电弧的氩弧机典型基波频率是 2.6MHz。氩弧焊机发射占有的频谱覆盖频率范围为 3kHz~120MHz，对大量的 RF 稳弧焊机在 305m 距离上测出有代表性的辐射电平如表 9.1-1。在距弧焊机 2m 的距离上，在 30MHz 时，E 场电平约为 124dB μ V/m/MHz (1.5V/m)。

表 9.1-1 RF 稳弧焊机的辐射电平

频率 (MHz)	0.7	25	30
辐射电平 (dB μ V/m/MHz)	75	82 和 80 (10mV/m/MHz)	70

1.2.2 介质 RF 加热器

由感应和介质 RF 加热器产生的场强基本上是窄带的，具有的峰值大约可延伸到 9 次谐波。感应加热器的基波工作频率为 1kHz~1MHz，而介质加热器则为 13MHz~5.8GHz。统计 36 个感应加热器的测量，在 30m 距离上最小和最大辐射的变化为 31.6 μ V/m~0.75V/m。

对 4 个不同制造商的 10 种不同型号介质加热器产生的辐射在 30m 距离处测量时，得到基波(27MHz)辐射最大值为 98.8dB μ V/m(87mV/m)，最小值为 75dB μ V/m(5.6mV/m)；但在 6 次谐波(162MHz)最大值降到 84dB μ V/m(15.8mV/m)，最小值降到 38dB μ V/m(79 μ V/m)。

1.2.3 荧光灯

荧光灯和气体放电管会产生波形特征类似于输电线噪声的脉冲状无线电噪声。荧光灯的最大辐射在 300kHz 时，测得的电平为 89dB μ V/m/MHz，如图 9.1-1 所示。

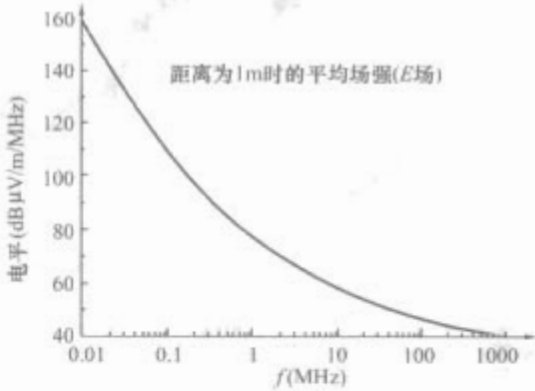


图 9.1-1 荧光灯的平均辐射电平

1.2.4 微波炉

工作在 ISM 频段 915MHz 的微波炉场强是在实验室中 3m 以及室外 300m 距离上测量的。测量 385 个微波炉，在实验室中，3.05m 处测到的最大场强是 1.5V/m。

1.2.5 电动机与发电机

典型的三相交流电动机供电电缆上的传导电流如图 9.1-2 所示，图中限值是依据 CE03 项按输入电流放宽得到的，在 16kHz 导线上的骚扰电流达 96dB μ A (60mA)。

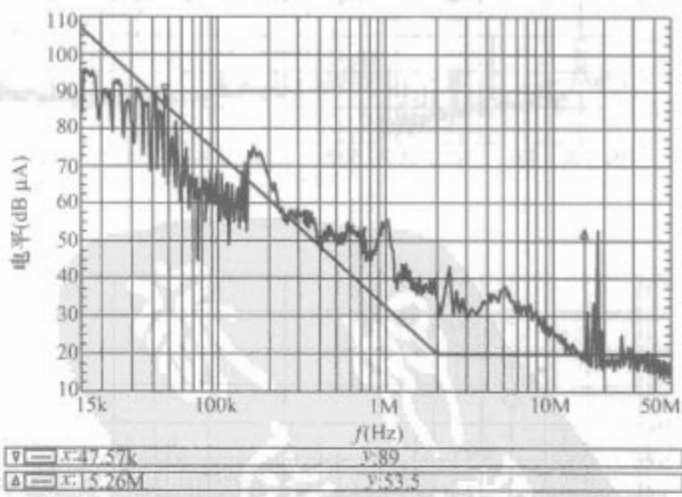


图 9.1-2 典型的三相交流电动机供电电缆上的传导电流

1.2.6 电力电子变流装置

电力电子变流装置应用的难点在其电磁兼容性，大功率开关器件的高速转换造成了电流的急剧变化，di/dt 形成了很高的骚扰电压。图 9.1-3 和图 9.1-4 分别显示了大功率变流装置电场辐射发射和传导发射测试结果。可见，在测试频率范围内，最大辐射电平达到 82dB μ V/m。

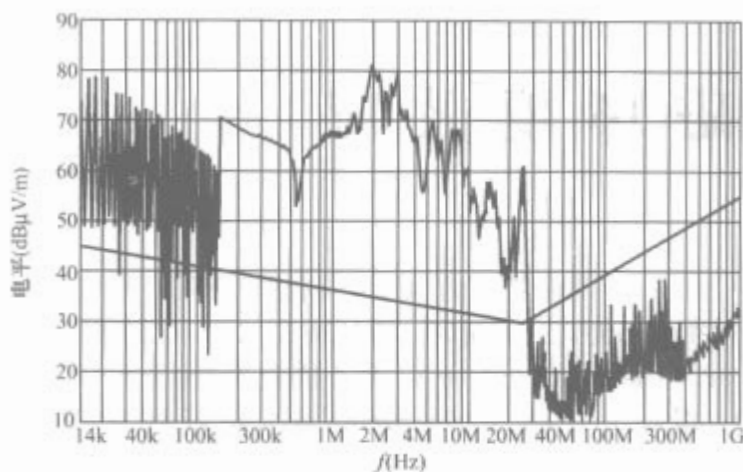


图 9.1-3 大功率变流装置电场辐射发射测试结果

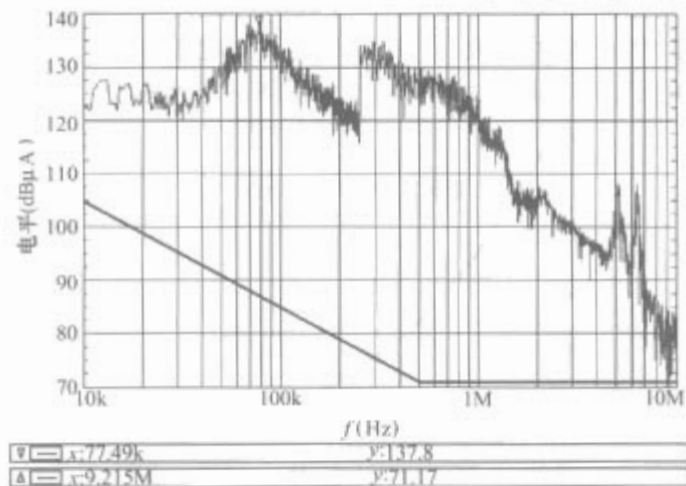


图 9.1-4 大功率变流装置传导发射测试结果

1.2.7 通信、雷达发射机辐射及杂散辐射

发射机会带来众多的谐波、杂散发射频率，图 9.1-5 所示为通信发射机电场辐射发射，杂散发射频率高达基波频率的数十倍以上，泄漏电平达 $95\text{dB}\mu\text{V/m}$ (56mV/m)。

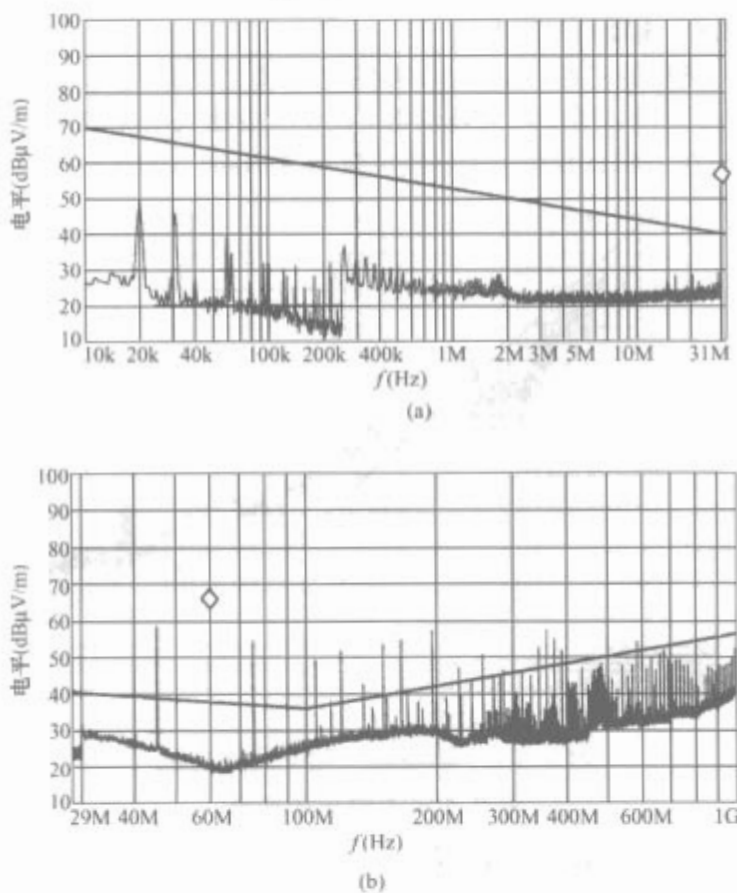


图 9.1-5 通信发射机电场辐射发射

(a) 10kHz~31MHz; (b) 29MHz~1GHz

1.2.8 高速数字电路

高速数字电路的电场辐射发射频率从数 MHz 到数百

MHz，主要是由于数字信号的上升沿陡峭而引起的高次谐波分量，如图 9.1-6 所示。

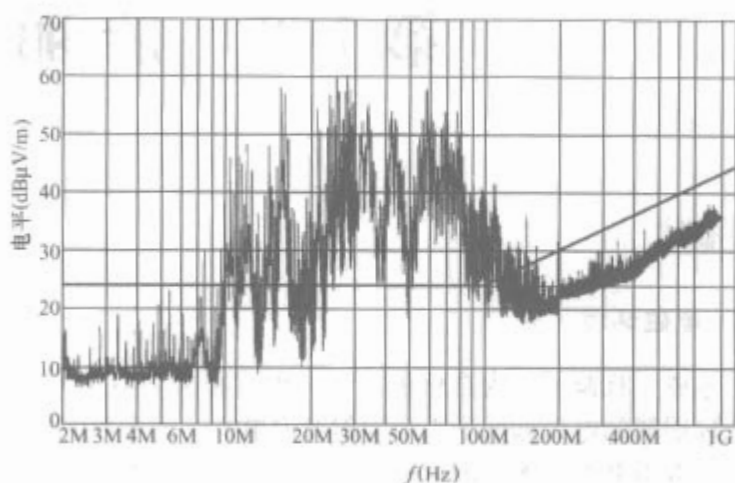


图 9.1-6 高速数字电路的电场辐射发射

1.2.9 典型舱室电磁环境

舱室电磁环境的主要干扰源包括电力电子变流设备、数字信号的发射、发射机泄漏、舱室缝隙导致的舱外电磁场进入等。舱室电磁环境如图 9.1-7 所示，最大电场发射达 $90\text{dB}\mu\text{V/m}$ (32mV/m)。

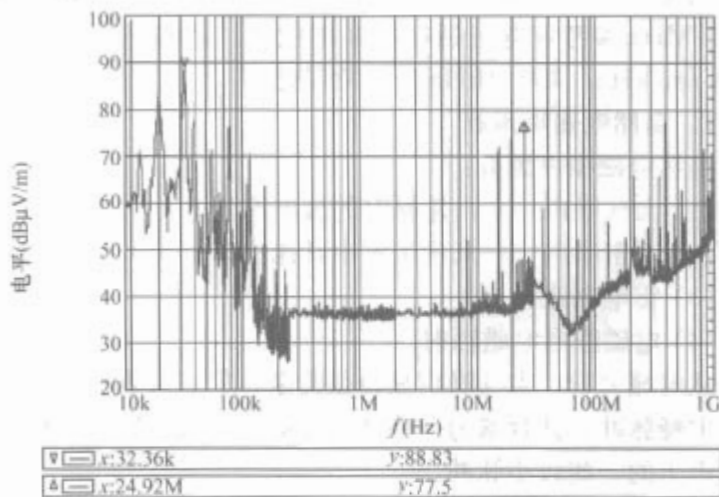


图 9.1-7 舱室电磁环境

1.2.10 地回路电磁干扰

某电力设备接地端子上的干扰电流如图 9.1-8 所示，最大达到 $130\text{dB}\mu\text{A}$ (3A)/14kHz，有可能对其他接地的低频小信号放大器造成干扰。

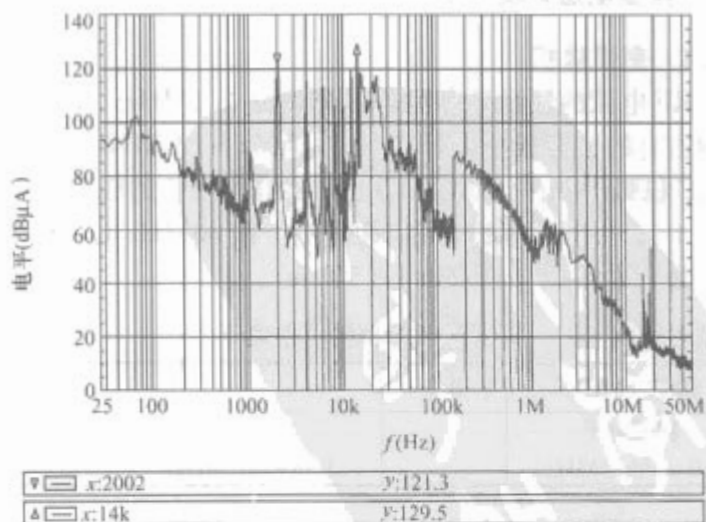


图 9.1-8 某电力设备接地端子上的干扰电流

1.2.11 有意辐射

电磁环境也充斥了来自无线电、电视和雷达发射机的有意辐射，所有这些有意辐射体都可能干扰接收的设备。例如由于使用民用波段无线电而引起的车库门虚假动作，通信干

扰间接引起战舰毁坏,或电磁干扰(因接近大功率发射机飞行)直接导致飞机坠毁。

无线电发射属于窄带发射,其基频连续波(CW)的谐波辐射是有限的。若这些谐波被调制,则导致边带也产生辐射。除了与基频有关的频率外,发射机也可能辐射本机振荡噪声和在发射机各级产生的宽带噪声。发射天线的辐射场强与距离、发射机的输出功率、天线的方向性、天线和测量点之间的相对高度、反射的距离或插入的吸波材料及建筑物等因素有关。图9.1-9给出了距无线电发射机100m处测得的典型最大场强分布。

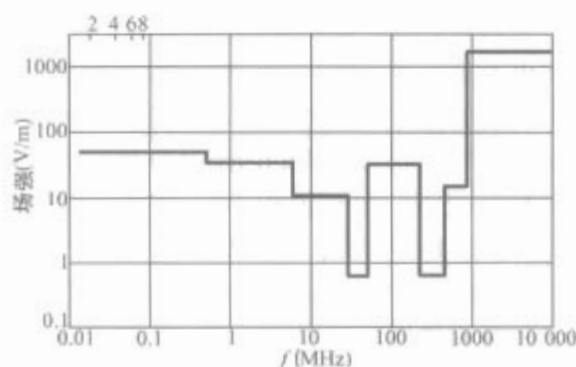


图 9.1-9 距无线电发射机 100m 处测得的典型最大场强分布

1.3 舰船电磁环境效应要求

舰船是电磁环境恶劣的复杂武器装备,评估一艘舰船的 EMC 水平,主要是看系统内的所有分系统和设备及它们彼此之间是否电磁兼容,系统与系统之间是否兼容,系统与外部的电磁环境是否兼容,舰上安全性关键任务系统、分系统、设备在上述环境下是否具有至少 6dB 的安全裕度。同时还应考虑静电荷控制、电磁辐射危害、电搭接、接地、电磁脉冲防信息泄漏、电磁发射控制等方面的相应要求。所有这些要求都必须完成鉴定性试验和分析。

1.3.1 安全裕度

根据舰船的任务和特性要求,确定关键安全件和对完成任务起关键作用的系统、分系统的安全裕度。对电爆装置,在需确保安全时,其最大不发火激励应有至少 16.5dB 的安全裕度;无需确保安全时,其最大不发火激励应有至少 6dB 的安全裕度。

1.3.2 系统内电磁兼容性

(1) 船壳引起的互调干扰。对于水面舰船,当用船上接收天线的接收机探测同船安装的高频发射机互调干扰时,若测不到 19 对及 19 对以上互调产物,则认为满足系统内的电磁兼容性要求。

(2) 舰船内部电磁环境。舰(船)载发射机的有意发射在甲板下产生的电场(峰值)不应超过下述电平。

1) 水面舰船。

金属: 10V/m 0kHz~18GHz。

非金属: 10V/m 10kHz~2MHz。

50V/m 2MHz~1GHz。

10V/m 1GHz~18GHz。

2) 潜艇: 5V/m 10kHz~1GHz。

(3) 电源线瞬变。电源分电箱处的尖峰传导发射电压应不大于 1.75 倍电源电压(额定值)或最高不超过 300V(取其小者)。

1.3.3 外部射频电磁环境

系统应该与规定的外部电磁环境兼容,系统的工作性能满足要求。该环境来自平台自身、编队航行的舰只、地面指挥系统、友方或敌方的发射机等。图 9.1-10 中给出了 GJB 1389A—2005《系统电磁兼容性要求》中所规定的舰船甲板上的设备、飞机、军械可能处于发射机主波束下工作所应承受的外部电磁环境,另外对飞行甲板和露天甲板分别给出外部电磁环境值。

从图 9.1-10 中可以看出,RF 发射机的威胁日益严重,尤其是舰载、机载等发射机的主波束内距离约 50ft 处的场强。图中列入的环境电平未考虑发射信号的调制、结构的反射及多个发射机的同时照射等情况,对于缝隙天线和相控阵天线应另进行近场修正。

1.3.4 雷电和电磁脉冲

电磁脉冲会对单个舰艇,甚至整个战斗群构成威胁,有关资料表明,大多数电磁脉冲能量在 1~10MHz 频段内,电磁脉冲感应的瞬变通常是以指数规律衰减的正弦波,其能量可以耦合到高频天线、桅杆、甲板区的导体中,并在系统和电缆上感应出大电流。在武器系统电缆上可感应几十至几百安,在高频天线上可感应几十至几千安,诸如导弹垂直发射系统、电子战系统、搜索雷达、无线电台、火控雷达等露天甲板上的设备均有电磁脉冲防护要求,内部连接电缆注入不大于 10A 电流,而露天部位连接电缆注入实测耦合电平,某些露天部位电缆如定向天线,则注入电流超过 100A。详

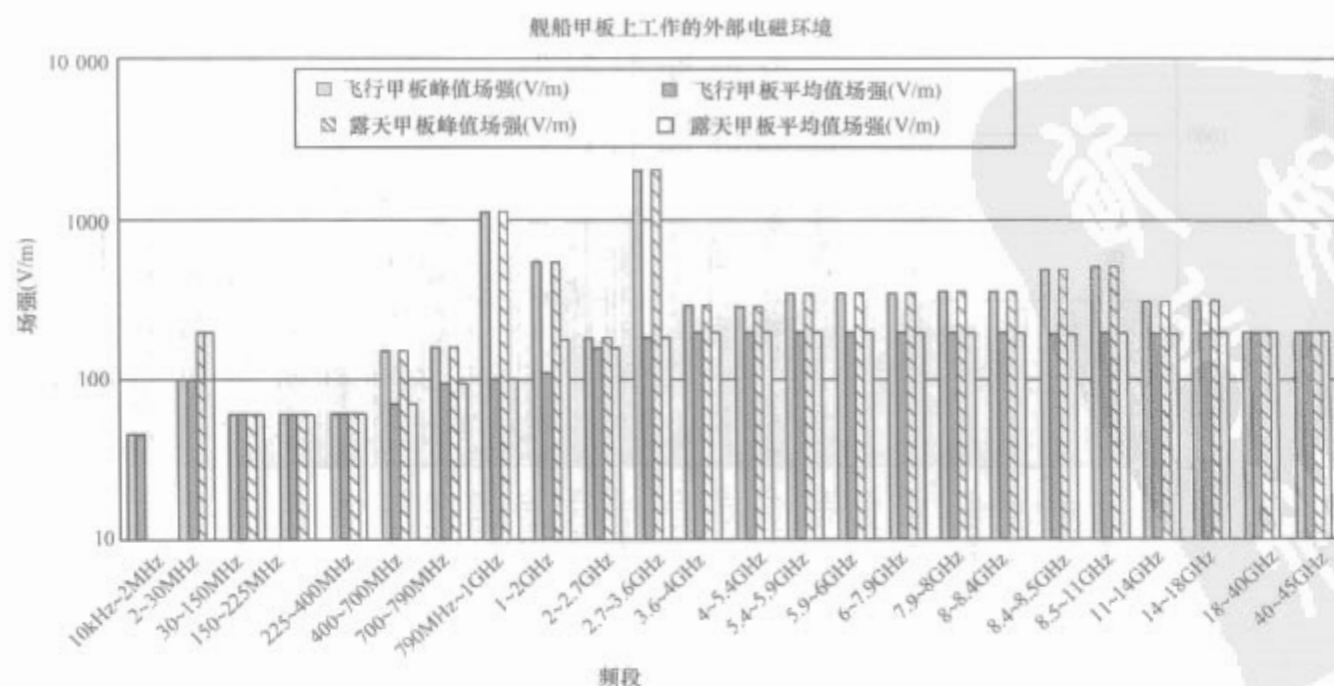


图 9.1-10 舰船甲板上的设备、飞机、军械可能处于发射机主波束下工作所应承受的外部电磁环境

见 GJB 151A—1997《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》中规定的 CS116 和 RS105 项。

1.3.5 分系统和设备的电磁干扰

每一个分系统和设备应满足干扰控制的要求,即应满足国军标 GJB 151A—1997 的要求。舰船直流磁场按 GJB 1446.41—1992《舰船系统界面要求电磁环境 直流磁场环境》要求,系统和设备性能不应降低。

舰船上的测量表明,在正常工作时根据位置和时间不同,直流磁场在 40~640A/m 之间变化,在消磁期间为 1600A/m。在露天甲板下往往会达到最大值,设备的典型要求是在 400A/m 时正常工作或在 1600A/m 时正常工作。另一个重要的参数是磁场的可能变化率,为 1600A/m/s。确定舰船磁场以确定哪些区域的场小于 400A/m,或者对特定的安装位置提出要求,也会有在 1600A/m 磁场下要求性能或者为了使用在安装中需要局部屏蔽的要求。

1.3.6 静电电荷控制

系统应控制和驱散由于沉积静电效应、液体流动、空气流动、航天器和发射装置充电及其他电荷产生原理产生的静电荷,以避免燃料点燃和军械发生危险,保护人员免受电击,防止电子设备的性能降低和损坏。对直升机外挂系统应经受 300kV 的静电放电,军械分系统承受 25kV 的静电放电。

(1) 静电电荷的产生及危害。由于电荷分离,灰尘、雨、雪和冰可能在系统结构上产生静电荷积累,这种现象称作沉积静电。

油罐中油的晃动和管子中油的流动都可能造成电荷的积累,并可能产生打火对燃油造成危害。系统中任何其他液体或气体(如冷却液和空气)的流动都同样可能产生具有潜在危害结果的电荷积累。

在维修过程中,人体与结构的接触能够在人体和结构(特别是在非导体表面)上产生静电荷积累,这种积累对人体或燃油的安全性构成危害,或可能危害电子设备。根据静电放电(ESD)脉冲的幅值和形状,可能敏感的电子部件是微电路、分立半导体器件、薄膜电阻器、集成电路、混合装

置和压电晶体。

军械对来自静电放电的意外点火是可能敏感的。最重要的是通过引爆用 EID 桥丝的静电放电。

在空中,由于飞行器表面的阳光照耀,航天器和运载装置经受电荷分离影响。

(2) 静电电荷的控制。系统结构的任何部分都能积聚静电电荷,必须采取适当的措施将这些电荷降低到避免产生任何有危害的电压水平。导电材料和非导电材料是不同的。导电材料上的电荷堆积会在材料内移动,使得所有的地方都具有相同的电位;在纯非导电材料上堆积的电荷不能移动,而在较小距离上可以存在较大的电位差。

控制静电充电是通过保证所有的结构表面至少是弱导体来实现的,所有的部件都要电搭接,并提供一条对地的导电通路。通常,不导电系统结构的内部部分都需要应用导电涂层。在大多数情况下,单位面积 $10^6 \sim 10^9 \Omega$ 的电阻率对驱散建立的静电荷是足够的。对人体的电击危害大约是 3000V,因此,系统部件上的静电荷不允许超过 2500V。

系统必须具有使燃油系统内出现火花的可能性最小的特点。系统设计必须考虑所使用的燃料导电性,如果必要,必须控制其导电性。燃油蒸气能被约 0.25mJ 的能量点燃。由于系统的结构特点,燃油系统的任何部件都可能积聚静电荷,而必须提供适当的措施来驱散这些电荷,需要采取电搭接、接地和导电涂层等措施,通过油罐铺设的管线需要特别注意。

在加油操作期间,燃油系统还必须防止油罐内打火。一些有用的要求是:

- 1) 燃油结构部件的搭接和接地。
- 2) 限制燃油管中的燃油流速不超过 9m/s。
- 3) 限制油罐入口处的流速不超过 3m/s。
- 4) 从底部给油罐加燃料。

1.3.7 电磁辐射危害

(1) 电磁辐射对军械的危害。电磁辐射对军械危害的外部电磁环境如图 9.1-11 所示。

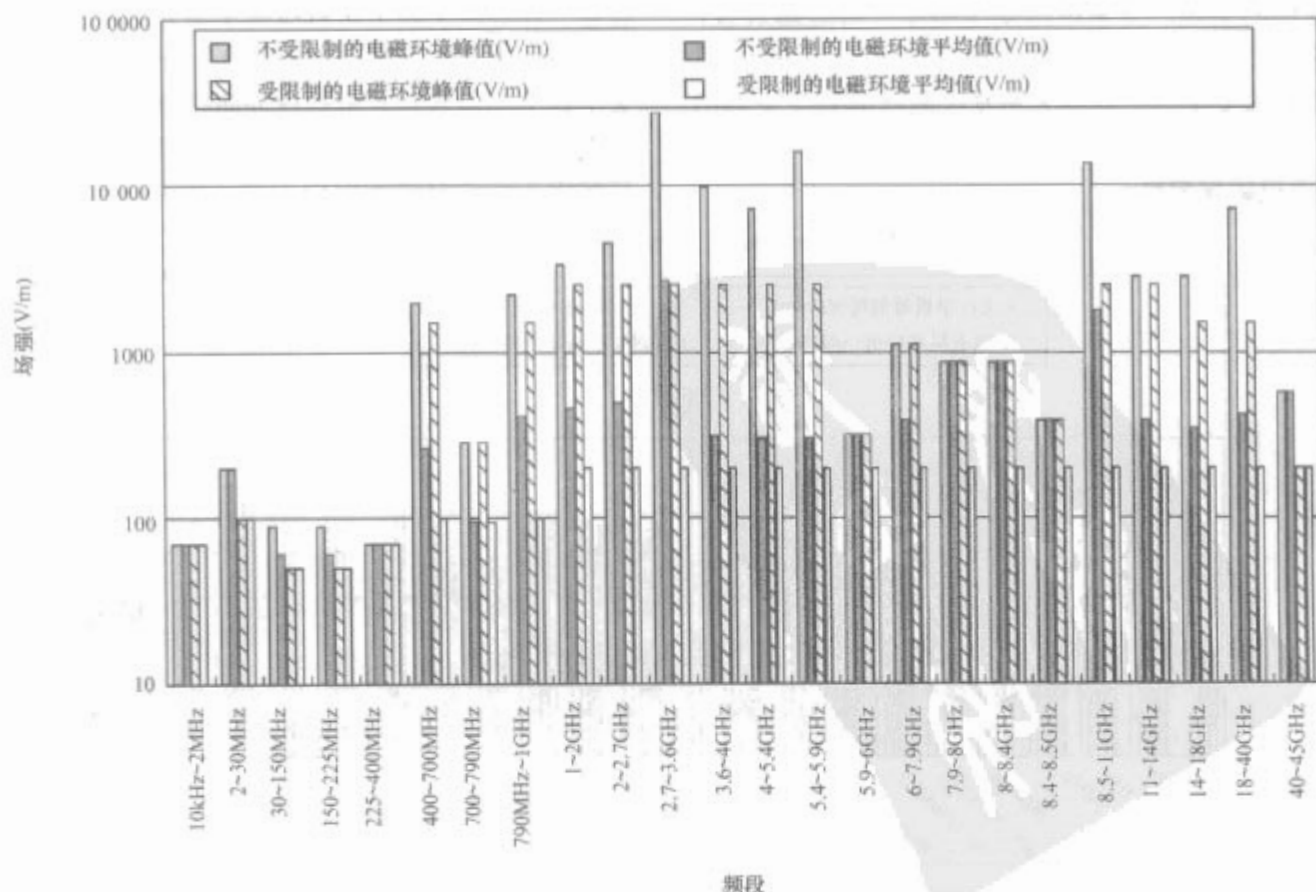


图 9.1-11 电磁辐射对军械危害的外部电磁环境

(2) 电磁辐射对人员的危害。恶劣的电磁环境和过量的电磁辐射是水面舰艇上工作人员人身安全和身体健康的重要隐患,连续或间歇性的暴露于过量电磁照射之中会导致工作人员身体功能紊乱,免疫系统机能下降,身体出现病变,造成工作人员心烦意乱,注意力不集中,导致误操作,从而造

成极其严重的后果。
我国对电磁危害的人员安全限值做了不同的规定,见表9.1-2。表9.1-3和表9.1-4分别列出限制接近和非限制接近的允许暴露电平,全部为6min平均照射时间间隔的允许暴露电平情况。

表 9.1-2 电磁危害的人员安全限值

标准号	对 象	频 率	波 形	平均功率密度			时间 (h)
				安全区	作业区	危害区	
—	—	—	脉冲连续	15 μ W/cm ² 30 μ W/cm ²	—	—	—
GJB 27—1984	职业	0.3~300GHz	脉冲	—	25 μ W/cm ² 200 μ W/cm ²	2mW/cm ²	8 1 8
			连续	—	50 μ W/cm ² 400 μ W/cm ²	4mW/cm ²	8 1 8
GB 9175—1988	公众	长-短波超 短波微波	—	<10V/m <5V/m <10 μ W/cm ²	<25V/m <12V/m <40 μ W/cm ²	—	24
GB 10437—1989	职业	超高频	连续	—	50 μ W/cm ² 100 μ W/cm ²	—	8 4
			脉冲	—	25 μ W/cm ² 50 μ W/cm ²	—	8 4
GB 8702—1988	职业公众	100kHz~300GHz	6min 平均	SAR<0.02W/kg	SAR<0.1W/kg	—	8 24

表 9.1-3 限制接近的允许暴露电平

频率 (MHz)	功率密度 (mW/cm ²)	电场强度平方 (V ² /m ²)	磁场强度平方 (A ² /m ²)
0.01~3	100	400 000	2.5
3~30	900/ f^2	4000(900/ f^2)	0.025(900/ f^2)
30~100	1.0	4000	0.025
100~1000	$f/100$	4000($f/100$)	0.025($f/100$)
1000~300 000	10	40 000	0.25

注 1. 限制接近区,不包括身高矮于1.4m的人员。
2. 表格中数据是利用自由空间波阻抗为400 Ω 推导出来的, f 以MHz为单位,为计算方便,一般不采用公认的377 Ω 。

表 9.1-4 非限制接近的允许暴露电平

频率 (MHz)	功率密度 (mW/cm ²)	电场强度平方 (V ² /m ²)	磁场强度平方 (A ² /m ²)
0.01~3	100	400 000	2.5
3~30	900/ f^2	4000(900/ f^2)	0.025(900/ f^2)
30~300	1.0	4000	0.025
300~1500	$f/300$	4000($f/300$)	0.025($f/300$)
1500~30 0000	5.0	20 000	0.125

(3) 电磁辐射对燃油的危害。燃油不应由于电磁环境辐射而意外点燃,手持或轻便的收发报机不应在距燃油口3m之内使用,可根据实际的射频功率密度计算危害距离;并且在加油条件下,限制射频发射机的使用。依据特殊燃料的挥发性和闪点确定环境要求。

安全距离计算:按所设计的电磁环境电平(功率密度或

场强),则在已知发射机输出功率及天线形式的情况下,可以按表9.1-5粗略计算安全距离。所谓粗略就是不考虑周围金属物体或障碍物的影响。详细、精确的计算,要借助矩量法或几何绕射法。表9.1-5的公式中: P 为发射机输出平均功率值; W ; A_r 为传输线的正交截面积; d 为离发射天线的距离; $D(\theta,\Phi)$ 为方向性函数。

表 9.1-5 功率密度计算表 W/m²

在波导内	发射天线主瓣轴线			偏离发射天线主瓣轴线	
	近场区	过渡区	远场区	近场区	远场区
同相辐射器 $\frac{P}{A_r}$	$\frac{P}{4\pi d^2}$	$\frac{P}{4\pi d^2}$	$\frac{P}{4\pi d^2}$	$\frac{P}{4\pi d^2}$	$\frac{P}{4\pi d^2}$
有增益G的发射天线 $\frac{P}{A_r}$	$\frac{GP}{4\pi d^2}D(\theta,\Phi)$	$\frac{GP}{4\pi d^2}D(\theta,\Phi)$	$\frac{GP}{4\pi d^2}$	$\frac{GP}{4\pi d^2}D(\theta,\Phi)$	$\frac{GP}{4\pi d^2}D(\theta,\Phi)$

续表

在波导内	发射天线主瓣轴线			偏离发射天线主瓣轴线	
	近场区	过渡区	远场区	近场区	远场区
盘形天线 $\frac{P}{A_r}$	$\frac{4P}{A}$		$\frac{GP}{4\pi d^2}$	$\frac{P^*}{4A}$	
发射天线 $\frac{P}{A_r}$ (有 100% 地面反射)	$\frac{GP}{\pi d} D(\theta, \Phi)$	$\frac{GP}{\pi d^2} D(\theta, \Phi)$	$\frac{GP}{\pi d}$	$\frac{GP}{\pi d} D(\theta, \Phi)$	$\frac{GP}{\pi d} D(\theta, \Phi)$

1.3.8 电搭接和接地

为控制电磁环境效应，系统电搭接应保证设备内部或设备与其他部分之间的电连续性。设备壳体到系统结构之间（包括所有的接触面）的搭接电阻小于或等于 10mΩ，电缆屏蔽层到设备壳体之间的搭接电阻小于或等于 15mΩ，设备内部的组件或部件之间的搭接电阻小于或等于 2.5mΩ。

1.3.9 发射控制

发射控制又称无线电静寂，在二战期间和越南战争中，无线电静寂有效地避免了战机或舰只被探测。如果系统在 500kHz~40GHz 频段满足 GJB 151A—1997 中 RE102 项的要求，则可分析出整个系统是否满足距系统 1 海里任意方向的无意发射不应超过 -110dB/m² 的要求。

1.4 舰船电磁兼容发展趋势

20 世纪 80 年代以来，以信息技术为核心的第四次军事革命以前所未有的广度和深度影响着整个世界，并将在未来几十年内更加完整、充分、深刻地展开。新军事革命将预警探测、指挥控制和精确打击三个作战职能一体化、网络化；将覆盖整个作战空间的通信系统、指挥系统、协调系统、情报系统、计算机工作站、各级数据库和各个用户终端组合为统一的数字化战场；将现有的民用和军用技术，用共同的软件、标准规程，对现有武器系统进行现代化改造，使其具备通用性、联动性，加速从传感器到使用者之间、各武器系统之间、各作战单元之间的信息流动。随着电子电气设备的发展，电磁兼容性技术将围绕提高系统恶劣电磁环境的适应能力，实现系统电磁兼容性精确预测、仿真、管理和利用频谱资源，以及开发和应用电磁干扰控制的新材料、新器件、新技术，研究电磁环境效应验证、试验及评估手段等方向发展。

2 电磁脉冲效应

电磁脉冲是指核爆炸或雷电放电时，在核设施或周围介质中存在光散射，由此产生的康普顿反冲电子和光电子所导致新的电磁辐射。由电磁脉冲所产生的电场、磁场可能会与电力或电子系统耦合产生破坏性的电压和电流浪涌。实际上具有危害效应的电磁脉冲除了核爆炸产生的电磁脉冲和雷电电磁脉冲外，静电放电产生的电磁脉冲、电磁脉冲炸弹产生的超宽带电磁脉冲、高功率微波武器产生的窄带电磁脉冲以及各种雷达工作时产生的电磁脉冲等，对电子设备均具有破坏作用。到武器一级的电磁脉冲，可以瞬间使电子设备烧毁，特别是高度依赖于计算机技术的电子设备和武器装备系统以及通信、交通、金融等基础设施，陷入瘫痪。本节将介绍几种典型电磁脉冲的特性以及电磁脉冲的危害和防护的一般要求。

2.1 几种典型电磁脉冲的特点

2.1.1 雷电电磁脉冲

有关雷电电磁脉冲的数据主要根据回击电流的时域特性

得出，而回击电流的时域特性来自两个方面。

(1) 设置在瑞士、意大利、南非等地的测试塔在闪击时直接测得的回击电流波形。由于塔的电感、电容和接地阻抗特性等因素的影响都比较大，有关第一次回击的测试结果可能丢失一些高频分量。

(2) 根据远距离电场和磁场的时域测量结果，采用适用于地闪回击电流产生的电场和磁场的模型，按近似公式计算得出。

2.1.1.1 地闪回击模型

对雷电电磁脉冲的研究当然离不开对其场源的研究。由于地闪的回击电流是幅度很大的脉冲电流，其峰值一般为 10~30kA，甚至可高达上百千安，故被称之为主放电，也自然成为首要的研究对象。地闪回击模型可以归纳为以下四种。

(1) 气体动力学模型。这类模型主要与一小段雷电通道的径向发展过程及其相关的冲击波有关，考虑一小段柱形等离子体按指定方式流动由随时间变化的电流。就其典型性而言，这类模型涉及 3 个气体动力学方程（有时也称流体动力学方程）的解，分别代表了物质守恒、动量守恒和能量守恒关系。与之联系在一起的是两个状态方程，方程的输入参数是随时间变化的通道电流，输出包括温度、压力和物质的密度，它们均为径向坐标和时间的函数。这类模型中有一些除了用于或可能用于研究雷电回击以外，在用于实验室空气火花放电研究方面已获得进展。

(2) 电磁模型。这类模型建立在有耗细线天线的基础上，以细线天线去近似雷电通道。为了求得沿通道的电流分布以便计算远区电磁场，该类模型涉及采用矩量法的 Maxwell 方程组的数值解，得出的通道电流包括了天线模电流和传输线模电流。电阻性负载有选 0.7Ω/m 的，也有选 0.065Ω/m 的。其中，有的模拟了电流输运中心及在其包含的大部分电荷周围形成的径向电晕对回击速度的影响，有的模型考虑了直的铅垂通道，而有的则涉及任意形状的二维通道。据报道，可包含放电分支、闪击物、上行连续放电及连带过程中的非线性影响。还有人用 Maxwell 方程以导行波沿导电柱体传播的方式描述了箭式先导和回击的过程，导引回击波的通道每单位长度的电阻假定为 16Ω/m。

(3) 分布参数电路模型。这类模型将雷电放电看成一垂直传输线上的瞬变过程，传输线的特征是以单位长度的电阻、电感和电容来描述的，故也称 RLC 传输线模型。传输线沿线的电压、电流分布可用电报方程求解。通常假定等效传输线通过前面引线放电至某一电位，然后以一给定的接地电阻接到大终端来引发回击。一般用以表示回击通道的每一个传输线参数都是时间和空间的函数，亦即传输线是非线性的且是非均匀的。通道电感随时间变化是由于输运电流的通道芯半径变化引起的，通道电阻随时间变化是由于电子密度、重粒子密度和通道芯变化的缘故；而通道电容随时间变化则主要因为在通道芯周围径向形成的

电晕套与可能包含的由前面引线沉积的大部分通道电荷中和的结果。传输线方程的精确解通常只能在 R 、 L 和 C 均为常量的情况下才能求得。有人曾用线性分布电路模型得出线性 RLC 传输线导行电磁波的特性，该传输线用以代表由箭式先导形成的预回击通道。当考虑了传输线的非线性，则求解电报方程必须采用数值技术，例如差分法。即使 R 、 L 和 C 为常量， RLC 传输线模型应用于雷电依然是一种近似。若将传输线参数 R 作为通道电导率的函数，而电导率是随通道温度和压力变化的，可采用气体动力学模型求得，因此，将分布参数电路模型与气体动力学模型相结合是一种合理的选择。

(4) 工程模型。这类模型所涉及通道电流（或通道电荷密度）的空间和时间分布建立在对雷电回击特性的观测基础上，这些特性包括通道基电流、前端的前向传播速度和通道亮度分布等。该类模型不去强调回击的物理特性，而将重点放在如何使模型预测的电磁场与在几十米至几百米距离上观测到的数据取得一致。其主要特点是可调参数的数量少，通常只有 1~2 个测量或假设的通道电流参数。

电磁模型、分布参数电路模型和工程模型的结果可直接用于电磁场的计算，而气体动力学模型可用来求得电阻随时间变化的函数，该函数正是电磁模型和分布电路模型的参数之一。鉴于分布参数电路模型和工程模型一般不考虑雷电通道的分支，这两种模型较好地描述了紧接着发生的闪击或通过上窜回击而到达第一个主要分支之前的第一次闪击，这段时间要比形成地面上初始电流峰值所需的时间来得长。如果没有其他方面的特殊规定，都假定通道是直的、垂直于地面且没有分支。对于气体动力学模型，由于考虑的是一小段通道的径向发展，因而对第一次闪击及其后的闪击都是可用的。而电磁模型对于第一次闪击和其后的闪击任何通道的几何形状都能刻画出来。

2.1.1.2 雷电效应的试验标准

直接雷击的雷电试验电流波形和电压波形如图 9.1-12 和图 9.1-13 所示。对直击雷间接效应的描述如图 9.1-14、图 9.1-15 和表 9.1-6 所示。

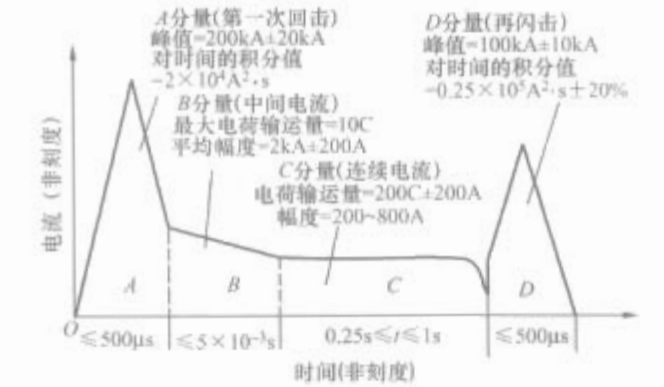


图 9.1-12 直接雷击的雷电试验电流波形

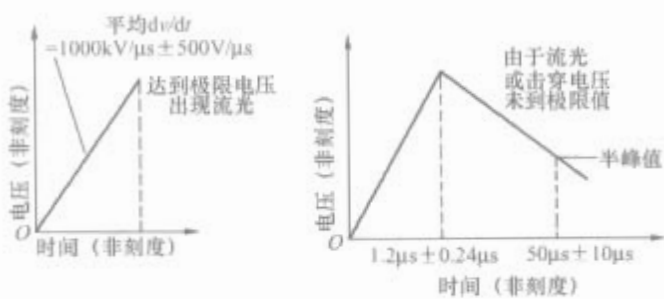


图 9.1-13 直接雷击的雷电试验电压波形

在表 9.1-6 中，除了图 9.1-12 所示的 C 段以外，其余所有的间接效应环境均用双指数波形的专用参数来定义各段电流随时间的变化。图 9.1-14、图 9.1-15 是雷电特性的示

意图，包括一系列大电流闪击的时间间隔和许多单个的小电流闪击时间间隔（后者间隔的时间更短），并按脉冲群持续的时间分组（多个脉冲群）。该模型仅用于预测间接效应对电子设备构成的潜在威胁，并不能预测哪个部位会发生什么样的物理损伤。

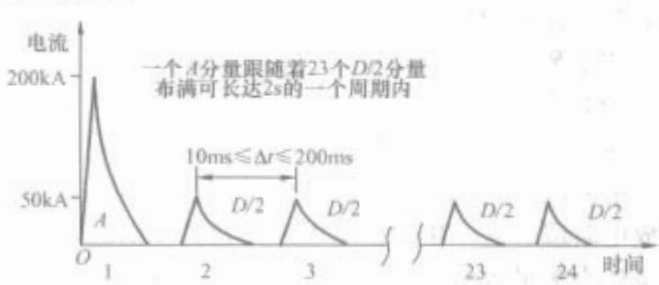


图 9.1-14 用于预测雷电间接效应的多次闪击电流模型

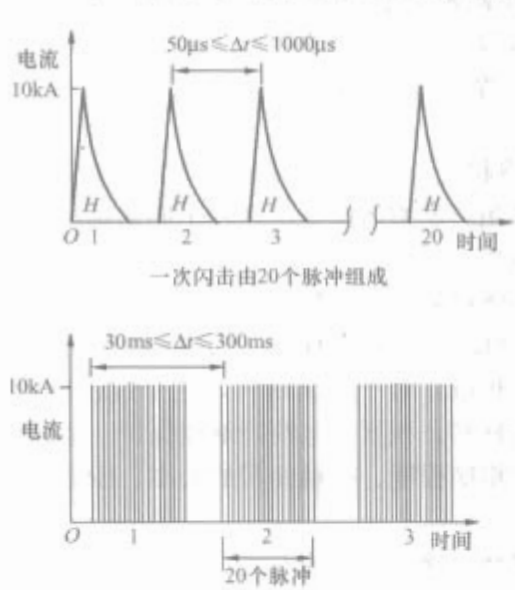


图 9.1-15 用于预测雷电间接效应的多次闪击脉冲群电流模型

表 9.1-6 雷电间接效应波形参数

电流分量	图形说明	$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$		
		I_0 (A)	α (s ⁻¹)	β (s ⁻¹)
A	强闪击	218 810	11 354	647 265
B	中间电流	11 300	700	2000
C	连续电流	400(对 0.5s)	—	—
D	再闪击	109 405	22 708	1 294 530
D/2	多次闪击	54 703	22 708	1 294 530
H	多次闪击脉冲群	10 572	18 791	19 105 100

按标准的规定，对于空间系统，希望飞行器和运载火箭对直击雷提供防护。通常不要求飞行器和运载火箭在直接遭受雷击时生存下来。雷电对飞行器和运载火箭的间接效应，要求用 100m 或更远距离上的电磁场。在发射前通过检测应能预计系统由雷击造成的使用性能上的任何损失。表 9.1-7 是一种特殊情况，用于直击雷附近的军用装备。暴露条件下的军用装备一般不要求导引装置起作用，然而必须免遭表 9.1-7 所规定的直击雷附近电磁耦合效应的毁伤。存放军用装备的包装物要设雷电导引装置，使装备免遭毁伤。

表 9.1-7 地闪附近的电磁场

距闪击 10m 处的磁场变化率(A/m · s)	2.2×10^5
距闪击 10m 处的电场变化率(V/m · s)	6.8×10^{11}

当闪电靠近一个物体时，其效应可按以上规定加以考虑。与闪电距离非常近的地方，峰值场强可达 3×10^6 V/m。一些闪电的实际频谱，其较高的频率分量比雷电模型预测的

要大。

2.1.2 静电放电电磁脉冲

2.1.2.1 静电放电过程

静电放电(ESD)是指不同静电电位的物体靠近或直接接触时产生的电荷转移。静电放电产生的电流可以通过绝缘击穿或者热效应来损坏半导体器件和电子元器件,导致数字信号反向或锁死,引起逻辑错误、程序流程错误、系统重新设置等;ESD电流产生的空间辐射场还会耦合到一些敏感电路,造成一些不明显的损坏。一个静电放电过程包括充电阶段和放电阶段,这两个阶段都可能干扰或损坏电子设备,尤其是放电阶段,它产生的快速电脉冲及其伴随的辐射场对电子设备的影响最大。

(1) 静电荷的充电积累。物体可以通过多种方式进行电荷积累,如摩擦起电、感应起电、汽化、热离子发射、光电发射、压力喷射、离子束充电、压电充电等等。在通常的环境条件下,摩擦起电和感应起电是产生ESD的最主要原因。

1) 摩擦起电。摩擦就是两物体的表面作相对运动所产生的相互作用,摩擦起电是由两种不同的物质通过摩擦和接触而带上电荷。

当两物体接触时,在接触表面约束力弱的电子将会向费米能级(结合能)低的物质移动。当两种物质分开时,积累的电荷会趋向扩散,对于金属材料,这个过程很快就完成了,但对于绝缘材料,积累的电荷能继续保持。电荷的积累还取决于表面的粗糙程度、接触面积的大小、压力、湿度以及相互运动等等。

人体典型的静电电压为6~10kV,很高的时候为15kV,最高可达到25~30kV。实际上人体带电的电压要低一些,在湿度较低时(15%~30%)大都在2~5kV的量级,在湿度较高时小于3kV。造成这些数据不一致的原因可能是由于使用了相对不准确的静电计,这种仪表的示值与被测物体的几何尺寸相关,对人体这样大尺寸的带电物体会过高估计其电压值。测量充电电压比较好的办法是采用电压探头。通常认为带电的人体对设备构成威胁的电压范围为0~15kV。

2) 感应起电。将一个不带电的导体移到一个电场里,受其影响,导体表面的电荷将重新分布,前面提到的人体带电也是这样一个例子。电荷重新分布(极化)时伴随着很小的电流,这个电流会导致器件本身受到破坏。导电性比较差的物质,在电荷重新分布的过程中,还会产生内部的电场。当物体电荷重新分布产生电荷极化后,我们将它分开成两半,结果分成两半的物体就都会带上电荷。采用另一种方法也可以达到同样的效果:将极化了的物体暂时接地,就会有电流从物体流向大地或从大地流向物体,使极化了的物体在接地端部分保持中性,移开接地线和场,就使物体带上了电荷。

(2) 放电。静电放电的过程实际上是两个不同静电电位的物体之间积累的电荷转移。由于电位不一样,在两个物体之间产生静电场,静电场的强度取决于两物体所带的电荷、间隙和电极的几何尺寸(电容量)。如果两物体之间的电场足够强,将击穿绝缘介质(一般为空气)而产生雪崩效应形成一条导电通道。一旦这条通道形成,电荷将迅速转移,直到放电电流降低到低于某一个界限值时,导电通道失效。通道的形成和失效可能会重复出现,导致多次的静电放电。放电电流的波形受多种因素的影响:包括靠近受扰设备的电极外形和它的阻抗特性、电极靠近的速度、受扰设备电极的外形及其阻抗特性、电荷电压、相对湿度等。

对于平行板电极(均匀场),计算和测量均表明,对于很小的间隙,要形成雪崩通道需要很高的场强。当间隙为0.1cm时,要求46.0kV/cm的场强;当间隙为1cm时,要求31.6kV/cm的场强;当间隙为10cm时,要求26.5kV/cm的场强。因此,当我们针对很小的间隙施加电压来产生ESD时,通常估计30.0kV/cm的场强就不太准确了。当电场不均匀和电极不对称时,放电过程要复杂得多。在这种情况下,两电极的极性能明显地改变产生火花时所需要的间隙间电压,尤其是对于较大的间隙和气压的情况下。当出现电子雪崩产生的电子流后,可能会导致击穿或者出现稳定的电晕放电,这取决于间隙的空间、施加的电压以及气压的大小。

2.1.2.2 ESD的电流波形和辐射场

本部分将阐述由人体和设备的放电所产生的电流波形以及一些等效的电路模型和产生的辐射场。

(1) ESD电流波形。带电的人体是产生ESD最主要的源,人体可以直接对受扰的设备放电,也可以通过附近的物体间接放电。对于人体充电放电的ESD重复测试是非常困难的,因此,需要用仿真的模拟器来模拟人体充放电,设计模拟人体放电特征的电路。

1) 人体电容。人体的电容可以用圆柱或球这样简单的部件来模拟。实际人体的电容还取决于人体的外形和周围的环境条件的影响,对一个站在地面上的成年人,其典型的集总电容值为100pF,人体电容测量值随人体离地板高度的变化如图9.1-16所示,有文献报道人体电容测量值超过200pF。由于测量方法的不同,会导致测量值偏差很大,不同的时间穿不同的衣服也会对测量数据产生影响。

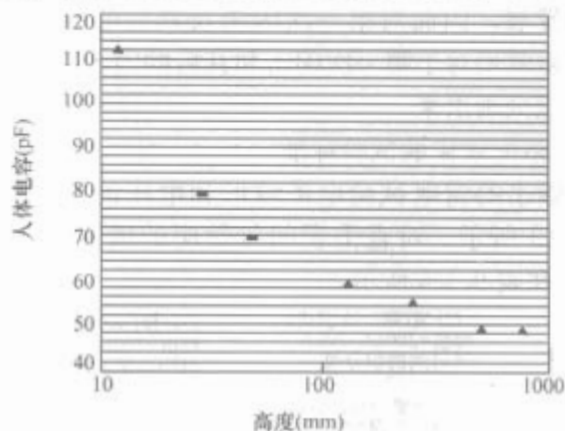


图9.1-16 人体电容测量值随人体离地板高度的变化

2) 人体放电——简单的RC模型。最初的ESD电路模型,基本上是一个150pF的电容C通过一个150Ω的电阻R进行放电,产生如图9.1-17所示的阻尼波形。电流波形的上升时间为5ns,50%幅度的持续时间为30ns,幅度代表了

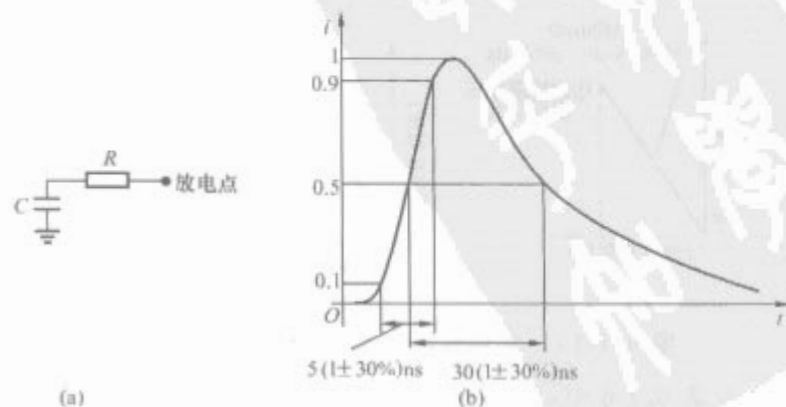


图9.1-17 RC ESD发生器简图和其产生的电流波形
(a)等效电路;(b)波形图

人们在工作场所可能会出现带电范围,最大值范围从 2kV 时的 9A 至 15kV 时的 70A(电容器充电)。其他组织提出的模拟器模型的电容值 C 为 60~300pF,放电电阻 R 的值为 10~10 000Ω。波形有所不同。

3) 具有快速初始尖峰的人体放电波形——双 RLC 模型。当测量 ESD 的示波器带宽超过 1GHz 时,我们看到的波形表明简单的 RC 模型需要修改。采用这种仪器测量表明,手臂和身体的贡献可能会大不一样,这样就导出了双 RLC 模型,双 RLC ESD 发生器的简单框图如图 9.1-18 所示。此外,还可以精确地区分开是手指头的贡献还是金属物体的贡献。

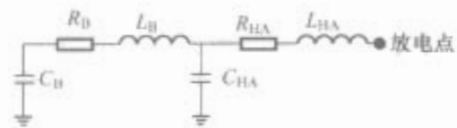


图 9.1-18 双 RLC ESD 发生器的简单框图

人体放电的双 RLC 电路模型认为,手前臂(下标为 HA)通过一个低电感的通道快速放电,这就产生了一个上升时间很快($<1\text{ns}$)的初始电流尖峰。初始尖峰的速度还取决于靠近速度和电极的外形,有报道说尖锐物体的上升时间低至 100ps。身体的电路(下标为 B)产生一个很长的脉冲,与图 9.1-17 中的波形相似。这两部分合起来后,就得到了如图 9.1-19 所示的电流波形。快速初始尖峰的上升时间 $t_{r,1}(<1\text{ns}, 10\%\sim 90\%)$ 表明 di/dt 具有很大的值,这里 $i(t)$ 表示电流波形。因此,与 di/dt 成比例的数值将会大大增加,如在环路中感应的开路电压或辐射远场,前沿效应很快,足以旁路掉 ESD 保护电路。比较慢的部分,其上升时间 $t_{r,2}$ 与简单的 RC 电路(1~10ns, 10%~90%)相类似。

现行的标准只是有代表性地规定了人体的 RC 参数,推荐的模拟器电路参数见表 9.1-8。对其余参数的确定,很大程度上取决于对 ESD 波形的模拟,这些参数的取值范围为: $L_B=0.4\sim 2.0\text{mH}$, $C_{HA}=3\sim 10\text{pF}$, $R_{HA}=20\sim 200\Omega$, $L_{HA}=0.05\sim 0.2\mu\text{H}$ 。新的标准趋向于注重特性而不是对结构的详细说明。

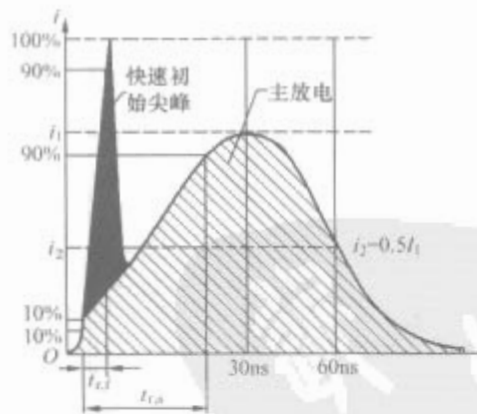


图 9.1-19 一般的 ESD 波形（包括快速初始尖峰）

表 9.1-8 推荐的模拟器电路参数

组织	C_B (pF)	R_B (Ω)
EIA	60	10 000
EIA	100	500
NEMA	100	1500
MIL	100	1500
IEC (第一版)	150	150
IEC (第二版)	150	330

续表

组织	C_B (pF)	R_B (Ω)
ECMA	150	330 或 15
SAE	300	5000

4) ESD 受扰电路。事实上,一个 ESD 事件不仅取决于带电电源或者模拟器的等效电路特性,还取决于受扰设备的响应。图 9.1-20 在双 RLC 模型的基础上,继续延伸,考虑了电弧阻抗 (R_A, L_A)、受扰电路 (R_V, L_V, C_V)、受扰设备与带电电极(手、手指、钥匙、螺钉旋具等等)之间的电容 (C_{FV}),以及手臂与受扰设备之间的电容 (C_{HAV})。

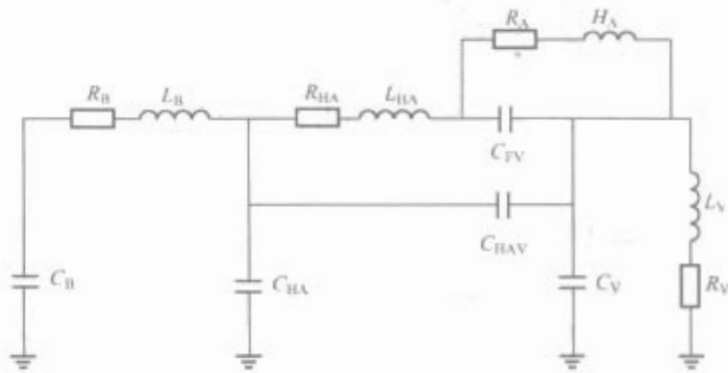


图 9.1-20 包括受扰设备响应的 ESD 过程的简单电路框图

所有这些等效电路均采用集总元件来模拟 ESD。然而,如果要测定高频分量的频率超过 1GHz 时,就需要一个基于传输线理论的更加复杂的电路模型。另外,电弧通道的阻抗是随时间变化的,可以采用基于 Topeler 准则的方法对其进行更好的模拟。附加的电感将导致放电过程比 C_{FV} 慢,身体的贡献将通过 R_B, L_B 以及上述所有串联阻抗进行放电;放电过程中的高频分量,特别是由手指和手臂的快速放电产生的分量,通常是沿着 C_V 流向地面,而不是沿着并联通路 R_V, L_V 。

表 9.1-9 IEC 801-2 (第 2 版) 波形检查参数

等级	指示电压值 (kV)	初始电流峰值 ($\pm 10\%$)	上升时间 t_r (ns)	在 30ns 时的电流 ($\pm 30\%$) (A)	在 60ns 时的电流 ($\pm 30\%$) (A)
1	2	7.5	0.7~1.0	4	2
2	4	15.0	0.7~1.0	8	4
3	6	22.5	0.7~1.0	12	6
4	8	30.0	0.7~1.0	16	8

5) 多次放电。前面考虑的是单次放电的情况。事实上,由于电弧通道的失效和重新建立,导致间隔 10 μs ~200ms 的多次放电。图 9.1-20 所示的电路表明,如果身体的 R_B, L_B 足够大,则手臂到手指的快速放电会将手臂手指上的电荷完全泄放,导致放电通道失效,即使 C_B 上还留有相当多的电荷。紧接着 C_B 会给 C_{HA} 和 C_{HAV} 重新充电,使得电弧通道重新建立。事实上,重新充电在受扰设备通道上感应的电流就可能是干扰源。试验放电电极向受扰设备移动过程中就会产生同样的效应。当间隙足够小时,就会越过间隙建立起一条放电通道,放电、断开,再重新建立。

6) 靠近速度的影响。快速初始尖峰很大程度上依赖于电极的靠近速度。所发现的情况基本上是这样的:①靠近速度越快,产生的上升沿越快;②电压越高,则要求靠近速度越快以实现快速放电。其主要原因是通道的形成时

间相对于电弧的持续时间要长；因此，对于给定的电压来说，靠近速度越快，电弧间隙越短。不同充电电压和靠近速度产生的上升沿斜率如图 9.1-21 所示，图中表示对于充电电压为 4kV、8kV、16kV，在不同的靠近速度下，放电上升沿斜率。在每种情况下都可以进行快速放电，由于仪表的限制图中显示的数据可能会掩盖实际更大的上升沿斜率。

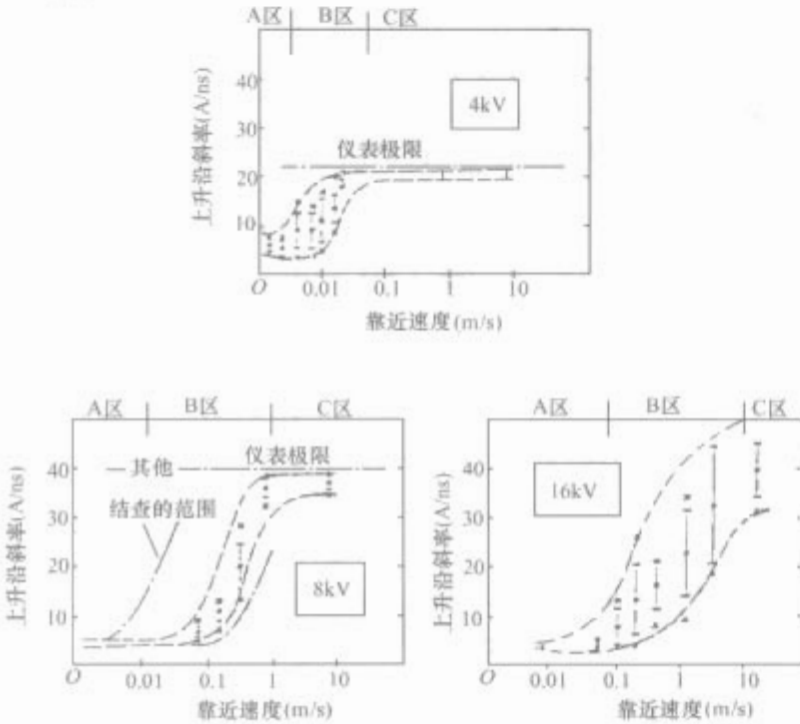


图 9.1-21 不同充电电压和靠近速度产生的上升沿斜率

结果显示三个不同的区：①对于比较低的靠近速度，上升沿 $<10\text{A/ns}$ 且结果的分散性比较小；②过渡区，该区上升沿在增加且结果的分散性较大；③到达测量仪器的极限后，真正的上升沿和结果的分散性可能被掩盖。B 区的结果最敏感，它受电极的凹痕、污物、湿度和其他条件的影响。我们还注意到，一个人拿着物体接近的典型速度为 $0.01\sim 0.5\text{m/s}$ ，对应电压范围为 $4\sim 16\text{kV}$ ，这种情况主要在变化比较大的 B 区。这再一次说明要完全重复 ESD 的影响（特别是在空气中测试）是非常困难的。

7) 设备放电。前面叙述了由带电的人体放电情况，事实上，还有一种放电是由带电的设备引起的，典型设备的电容量见表 9.1-10。

表 9.1-10 典型设备的电容量		
设备	自由空间 (pF)	靠近地面 (pF)
手推车	130	145
椅子	75	90
工具箱	37	39

设备在靠近地面时的电容量比自由空间的要大一些，但似乎更接近人体靠近地面时的电容量 (100pF)。确切的电容量还受设备与其周围物体相对位置的影响。与人体放电相比，设备放电最大的区别就是金属设备所固有的低阻抗特性（在 $15\sim 75\Omega$ 量级）。其电路框图与图 9.1-17 (a) 相似，只是增加一个小的串联电感 ($<1\mu\text{H}$)。这样就产生了一个弱阻尼的放电波形，图 9.1-22 显示的是一个实验室手推车在电压 1kV 时的放电波形。这是一条正弦阻尼振荡波形（峰值幅度为 29A ，振荡频率约为 42MHz ）。这个例子说明，设备放电时，即使是很低的带电电压也能产生相当大的放电电流。

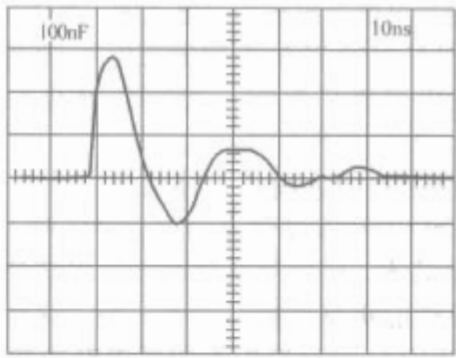


图 9.1-22 金属手推车 1kV 放电波形

8) 带电的仪器设备放电。带电的仪器设备放电主要是指设备本身获得电荷后接着向地面放电的情况。比如说，将一个整机电路从一个没有静电防护的包装箱里取出来（充电过程），放置在一个导电面上（放电过程）。简化带电设备电路框图如图 9.1-23 所示。举个例子，当 $C_D=3.6\text{pF}$ 、 $R_D=10\Omega$ 、 $L_D=10.0\text{mH}$ 、充电电压为 500V 时，产生一个快速正弦阻尼振荡的放电电流（第一峰值为 8.3A ）、上升时间为 0.5ns ，周期小于 10ns ，危害主要是通过热效应引起的。

9) 机械放电模式。与设备模式不同，机械模式主要由一个大约 200pF 电容和一个很低的电阻 ($<10\Omega$) 组成。这种模式用于表示机器人手臂、机动车辆以及类似的大型设施。放电波形与设备放电波形相似，只是电流比较大 ($>100\text{A}$)，周期比较长 ($>100\text{ns}$)。

(2) ESD 辐射场。研究 ESD 所产生的辐射场是比较复杂的，它取决于侵入和受扰设备的配置、带电电压、靠近速度、电流波形和湿度等。另外，由 ESD 产生的场也很难测量，因为它所包含的频段很宽。当然，我们可以采用简单的模型来说明基本的辐射机理和影响特性。

1) ESD 辐射的无限长导线模型。分析由 ESD 过程产生辐射场的一种近似方法是将放电电流路径模拟为一根无限长导线，可粗略表示一根导线或者由 ESD 在金属表面产生的电流，此时电流路径的长度比耦合距离大很多，因此，我们可以应用一种简单的准静态分析方法。采用如图 9.1-24 所示的柱坐标系 (ρ, φ, z)，导线方向为 z 方向。采用毕奥——沙伐定律求出距导线 ρ 处的磁通密度 \vec{B} ，则

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho} \quad (9.1-1)$$

磁场强度与电流波形幅度是成比例的。

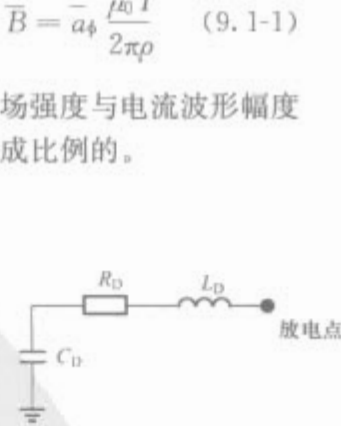


图 9.1-23 简化带电设备电路框图

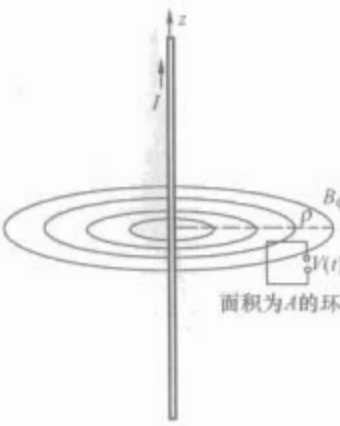


图 9.1-24 细长电流的磁通密度

2) 开路感应电压。近似地认为导线模型中面积为 A 的环所在位置处的磁通密度是均匀的，平均距离为 ρ ，则开路环上感应的电压为

$$V(t) = \pm \frac{\mu_0}{2\pi\rho} A \frac{di}{dt} \quad (9.1-2)$$

符号取决于环表面向量 ds 与磁通方向同向还是反向，感应电压取决于线上的电流波形。因此，激励信号不一样，

环的响应也不一样。结果表明,很快的ESD波形可以引起很高的电压。

3) ESD辐射的偶极子模型。在1)中的模型是假定电流路径远大于耦合距离,当电流路径远小于耦合距离时,情况就相反了。在这种情况下,使用偶极子辐射模型是比较合适的。特别是短线性偶极子的辐射模型已经用于模拟低阻抗目标的ESD放电。理想导电平面上的垂直偶极子基本模型如图9.1-25所示。

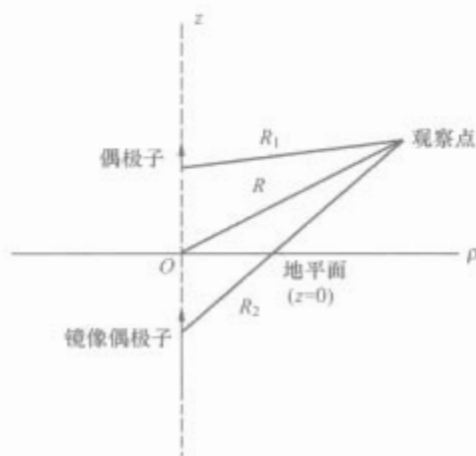


图 9.1-25 理想导电平面上的垂直偶极子基本模型

分析处在理想导电平面上的一短（垂直）线偶极子，由靠近地面的偶极子（ $R_1 \approx R_2 \approx R$ ）辐射产生的时变场具有以下关系

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) \approx & \bar{a}_\rho dl \frac{\eta_0}{2\pi} \left[\frac{3i(u)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right] + \\ & \bar{a}_z dl \frac{\eta_0}{2\pi} \left\{ \left[\frac{3z^2}{R^2} - 1 \right] \frac{i(u)}{R^2} + \right. \\ & \left. \left[\frac{z^2}{R^2} - 1 \right] \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right\} \end{aligned} \quad (9.1-3a)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) \approx \bar{a}_\phi dl \frac{1}{2\pi} \frac{\rho}{R} \left[\frac{i(u)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right] \quad (9.1-3b)$$

式中： dl 为偶极子的有效长度（放电通道加目标长度）； $\eta_0 = 120\pi$ ； c 是自由空间电磁波传播速度； $i(u)$ 是随时间变化的ESD电流波形在时间 u 时的电流，这里 $u = t - (R/c)$ ， R 是放电点到观察点的距离。

对金属表面的放电可以近似为偶极子接近地平面，这表明静电放电辐射场具有两个区域：一个是由 $i(u)$ 支配的近场区，一个是由 $\partial i / \partial u$ 支配的远场（传播场）区。对于人体放电，由手到手臂的贡献产生的快速初始尖峰将决定近场和远场的峰值。由身体产生的较低但持续时间较长的贡献将主要在近场区影响设备，也具有能产生破坏效应的能量。

图9.1-26显示了这种模型有代表性的一些数据。考虑4kV的放电电压对一个低阻抗目标放电，放电时电极与目标间是固定间隙（靠近速度为0）。测试的电流波形如图9.1-26(a)所示，上升时间在1ns量级，峰值电流幅度约为25A，为初始尖峰和由身体产生波形的开始部分。图9.1-26(b)表示的是在距离为1.5m、地面高度为30cm处的预测和实测的垂直电场。目标紧贴地板面固定，理论值与实验值吻合的非常好。更重要的是，图9.1-26(b)表明，在ESD放电点几米以内是可能产生短暂而强烈的场（ $>150\text{V/m}$ ）。图9.1-26(c)表示的是伴随放电产生的频谱，可以看出所包含的频率成分超过了1GHz，带宽超过了5GHz。

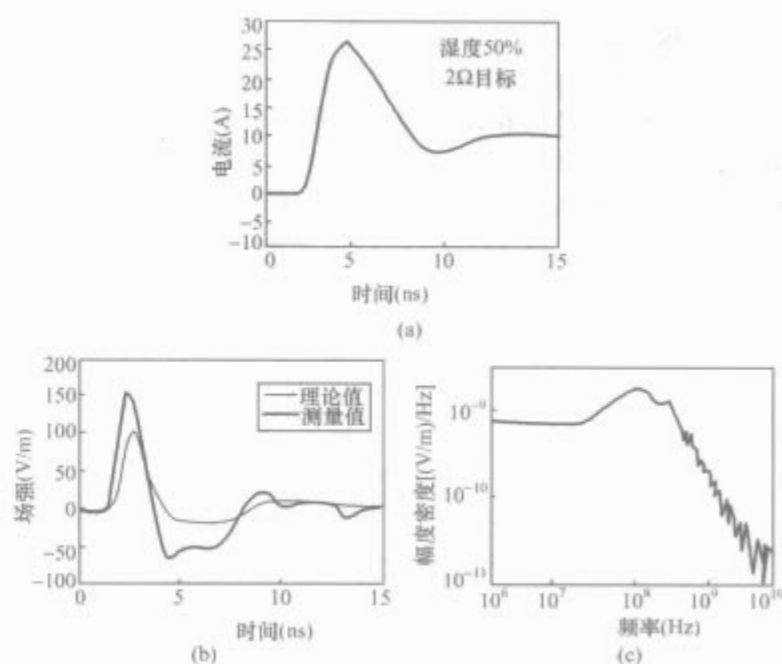


图 9.1-26 测试值和预测值（由4kV电压，固定放电电极产生）

(a) 电流波形；(b) 垂直电场；(c) 频谱带宽

4) 偶极子的近场区。近场是靠近辐射源的非平面波区域，主要是电抗场。对于一个简单的偶极子，近场区的范围约为 $\lambda/2\pi$ ，这里 λ 是波长。在频率为1MHz、100MHz和1000MHz时，其近场区分别为48m、0.48m和0.048m。由于ESD的频率范围很宽，因此受扰害设备很可能处在近场中。

按照3)中的模型，由ESD事件产生的近场看起来主要与电流波形 $i(t)$ 本身成正比，因此，电流波形的幅度越高，预计的电抗场也越高。采用图9.1-26(a)中的4kV放电波形作为 $i(t)$ 输入，预测所得的电场和磁场的近场强度将是耦合距离的函数，如图9.1-27所示。离地高度还是30cm。这些数据表明，在靠近ESD事件的地方电场强度可能超过1kV/m，对应的磁场曲线与图9.1-27相似，幅度值将超过10A/m（在距离为10cm处）。磁场和电场的幅度均足以对受扰害设备产生严重的干扰。

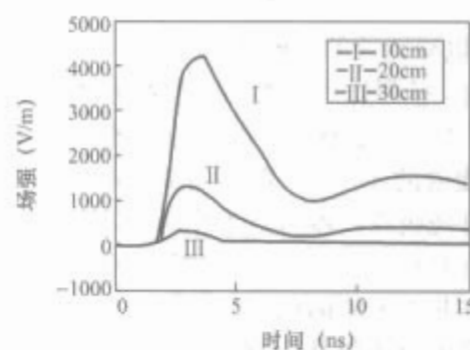


图 9.1-27 偶极子辐射模型产生的场随观察距离的变化(4kV固定电极放电)

5) 偶极子的远场区。远场区主要指类似于平面波（其波阻抗为 120π ）的辐射场区域。偶极子模型表明，传播场主要由电流波形对时间的导数 $\partial i / \partial t$ 来决定。因此，快速接近放电产生的快速上升沿导致的损害最大。远场也是产生间接损害的重要因素，不过这时场必须传播一定的距离，如果产生的电流与场信号相差很远，比如2)中介绍的开路环，则电路的响应将取决于二阶导数。上面的例子中，一个4kV的零靠近速度放电，产生的电流波形斜率近似为20A/ns，实际上这个波形斜率可能达到40A/ns，因此，场强可达到图9.1-27所示值的两倍以上。

2.1.3 核电磁脉冲

2.1.3.1 高空核爆炸电磁脉冲的主要特点

对于高空爆炸，在地面附近，电磁脉冲一般可作平面波处理，尽管不同位置上波形不同，幅值和上升时间都不一样，但可用双指数波来近似，高空核爆炸电磁脉冲典型波形如图 9.1-28 所示。其频谱及在频域的能量分布如图 9.1-29 和图 9.1-30 所示。

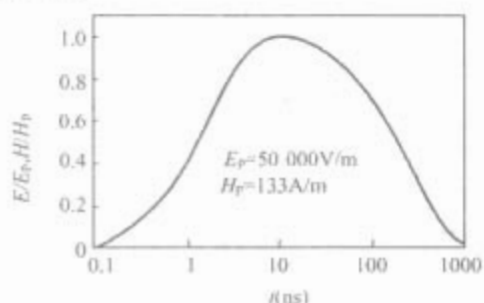


图 9.1-28 高空核爆炸电磁脉冲典型波形

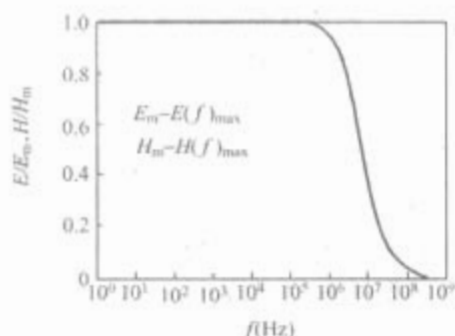


图 9.1-29 高空核电磁脉冲归一化频谱图

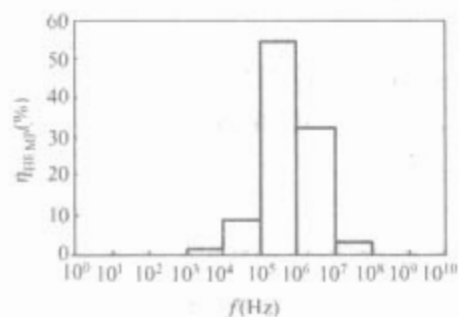


图 9.1-30 高空核电磁脉冲频谱中各频段能量比例图

2.1.3.2 核电磁脉冲的一般特点

(1) 能量。核爆炸产生瞬发 γ 射线的能量约占爆炸能量的 0.3%，其中以电磁脉冲形式释放的能量，在高空爆炸时约占这部分能量的 $1/10^2$ ，在地面爆炸时占 $1/10^7$ 。按此比例计算，百万吨级核武器高空爆炸以电磁脉冲形式释放的能量，高空爆炸时约为 10^{11} J，地面爆炸时约为 10^6 J。尽管这些能量分布在非常大的面积上，电子、电力系统的某些部分作为电磁能量的收集器从中耦合 1J 以上的能量是完全可能的。例如，计算结果表明，对于上千米的终端匹配电力线，在遭受高空核爆炸电磁脉冲作用时可收集到几百焦耳的能量。而在极短的时间内，接收几分之一焦耳的能量就可能造成电子设备的临时性故障或永久性破坏。在电磁脉冲模拟试验中，百分之几焦耳的能量即可使低频晶体管损坏，千分之一焦耳的能量就足以使微波半导体二极管损坏。

(2) 波形。核电磁脉冲具有很高的峰值场强，电场强度可达 $10^4 \sim 10^5$ V/m，磁感应强度可达 10mT，而且很快上升至峰值。上升时间的典型数据为 10^{-8} s。从频谱看，以高空核爆炸电磁脉冲为例，其频谱覆盖了从超长波直至微波低端的整个频段，从而对无线电通信、导航和广播等系统的安全运行构成了严重威胁。

(3) 覆盖的地域。地面爆炸时电磁脉冲源区的覆盖半径

为 3~8km，而高空爆炸时地球上凡能看到爆点的地方皆能受到电磁脉冲的覆盖。取爆高为 40km，则电磁脉冲覆盖的地面半径为 712km；爆高为 80km 时，覆盖半径达 1000km。因此，暴露在高空核爆炸电磁脉冲环境中的长导体（如架空电力线、架空通信线、铁轨等）可能收集到巨大的能量，而与此些长导体相连的电力、电子设备就可能遭受损坏。

2.1.3.3 高空核电磁脉冲环境

当核爆炸发生在大气层以上，例如 100km 的高度上，瞬发 γ 辐射较强。 γ 光子穿出弹体外壳后，位于厚度仅几米而半径以光速增加的一个球面壳层中。该壳层向下扩展的部分与 20~40km 高度上的大气层发生明显的相互作用，高度约 30km 处康普顿电流将达到最大值。此高度以上因空气密度低，康普顿散射作用弱，而在较低的高度上，则 γ 又大部分已被吸收了。在 γ 辐射的能量沉积区，康普顿电流有两个分量：①沿爆点向外的径向分量；②地磁场作用下引起的与径向垂直的横向分量。由于 γ 壳层与大气相互作用不可能是球对称的，径向电流也会如电偶极子模型那样激励起横向场，由径向电流激励的场时间特性与电流的空间分布有关，滞后于 γ 和康普顿电流，是一个幅值较低的长脉冲。激励电磁脉冲横向场的电流源主要是康普顿电流的横向分量，类似于磁偶极子模型。而且横向电流所激励的场，其时间特性与电流的空间分布无关，仅依赖于辐射源的特性，基本上与康普顿电流是同步的，故幅值高，持续时间短。

(1) 高空核爆炸电磁脉冲在地面上的覆盖范围及场分布。高空核爆炸时，电磁脉冲不只是从源区垂直向下辐射，还从源区的边缘以不同角度向地面辐射。因此，电磁脉冲的高频分量在地面上的作用区域延伸视界范围（即地面上能够“见到”爆点的范围），频率较低的分量甚至能伸延至视界范围之外。显然，爆点越高，电磁脉冲在地面上的覆盖范围越宽。若以从爆点向下所能“见到”的地面范围（即视界范围）来计算电磁脉冲在地面上的覆盖半径 R （地球半径为 6370km），则 R 随爆高 H 的变化见表 9.1-11。

表 9.1-11 高空核爆炸电磁脉冲在地面上的覆盖半径随爆高的变化情况

爆高 H (km)	40	50	60	70	80	90	100
覆盖半径 R (km)	712	796	871	940	1004	1065	1121

地面上受电磁脉冲覆盖的范围内，峰值场强的大小将取决于爆炸当量、爆高、观测点的位置以及相对于地磁场的方位。当爆炸当量在几十万吨以上，爆高为 100~500km，地面零点（爆点在地面上的投影点）位于北纬 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间的情况下，按峰值场强最大值 E_{\max} 计算，地面上等场强线的分布情况如图 9.1-31 所示。图中按爆高 H 的整数倍标出了地面上的各点与地面零点的距离。此图用于地球赤道以南地区时，图中指示磁场北的方向应改为磁场南。由图中等场强线的分布情况可以看出，电磁脉冲覆盖范围内，大部分地区的电场强度高于 $0.5E_{\max}$ ，当量在几十万吨以下时，另当别论，因为此时在地面视界处的场强已明显低于 $0.5E_{\max}$ 。

图 9.1-31 所示的等场强线不适用于爆高大于 500km 的情况，因为对于这样的爆高，电磁脉冲在地面上的覆盖半径已低于爆点的 5 倍，而该图与地面零点的距离是以爆高来标度的，因而不具有任何意义。

地面上电磁脉冲等场强线的分布主要取决于地磁场的方位、磁倾角以及观测点与爆点的距离等几何因素。图 9.1-31

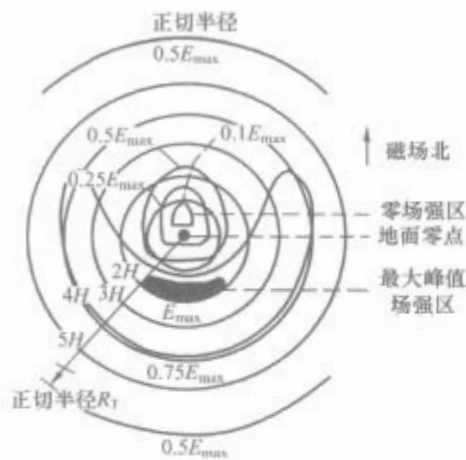


图 9.1-31 地面上等场强线的分布情况

略偏向地面零点之北的低场强区是由地磁场磁力线与水平方向之间的倾角造成的。从理论上说，低场强区的中心存在一个零场强点，该处康普顿电子并不围绕磁力线转，而是直接沿着磁力线的方向运动，但由于其他的作用过程，比如 γ 沉积区内的振荡，将在地面产生弱的电磁脉冲。在更大的地面范围内，场强的其他变化则是由离爆炸点的斜距不同而引起的。

虽然 E_{\max} 随地面零点所处纬度的变化可能并不很大，但地面上电磁脉冲等场强线的分布将随磁倾角的变化而改变。当纬度高于 60° ，磁倾角较大， E_{\max} 和 $0.75E_{\max}$ 的等场强线越趋近于围绕地面零点。当磁倾角为 90° ，从理论上说，等场强线可能由一族围绕地面零点的圆组成。地面零点处的场强为零；当纬度低于 30° ，磁倾角较低，地面上的等场强线将变得更不像圆，发散的趋势将有所增加。

(2) 高空核爆炸电磁脉冲辐射环境的描述。

1) 表述。美国 1962 年在进行一系列高空核试验的过程中，由 Los Alamos 科学实验室成功地测到了电磁脉冲的波形，如图 9.1-32 的曲线 C 所示。图 9.1-32 中曲线 A 为理论计算结果，曲线 B 则是由曲线 A 用测试设备的系统响应函数进行卷积计算得出的。由图可以看出，计算结果与实测结果吻合得很好。显然，图中的理论波形可用双指数函数来拟合。因此，在一些有关的标准和公开出版物中，高空核爆炸电磁脉冲辐射场的典型波形，通常都以双指数函数来描述。

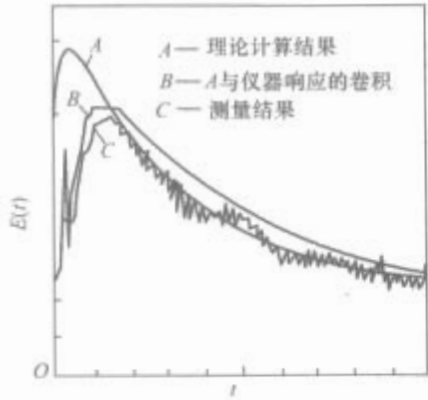


图 9.1-32 高空核爆炸电磁脉冲理论波形与实测波形的比较

从对高空核爆炸电磁脉冲的防护出发，高空核爆炸电磁脉冲辐射场设定为

$$E(t) = (E_{h0}a_h + E_{v0}a_v)(e^{-at} - e^{-\beta t}) \quad (9.1-4)$$

式中： a_h 为沿电场水平极化方向的单位矢量； E_{h0} 为水平极化电场峰值的模，为 50kV/m ； a_v 为沿电场垂直极化方向的单位矢量； E_{v0} 为垂直极化电场峰值的模，为 15kV/m ； $a = 4 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ ， $\beta = 4.76 \times 10^8 \text{s}^{-1}$ 。

脉冲的归一化频谱图及频谱中各频段能量占总能量的百分比分别如图 9.1-29 和图 9.1-30 所示。可以看出，高空核爆炸电磁脉冲的能量绝大部分（约 99%）集中于 100MHz 以下的频段，总的能量密度约为 1J/m^2 。

高空核爆炸电磁脉冲辐射场电场强度 (V/m) 的典型表达式为

$$E(t) = 5.25 \times 10^4 (e^{-at} - e^{-\beta t}) \quad (9.1-5)$$

式中： $a = 4 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ ； $\beta = 4.76 \times 10^8 \text{s}^{-1}$ 。

将式 (9.1-4) 与式 (9.1-5) 对比，显然， $E(t)$ 的峰值 $E_p = \sqrt{E_{h0}^2 + E_{v0}^2}$ 。式 (9.1-5) 表达的场强波形被称为“贝尔实验室波形”。对于这种双指数型脉冲波形的主要特征常按图 9.1-33 所示的方式描述。图中， E_p 为电场强度峰值； $t_r = t_3 - t_1$ 为上升时间； $t_{hw} = t_6 - t_2$ 为半峰宽； $t_p = t_4$ 为峰时； $t_f = t_7 - t_5$ 为衰落时间。“贝尔脉冲”波形最主要的特征是上升时间不到 5ns ，半峰宽度不到 200ns 。

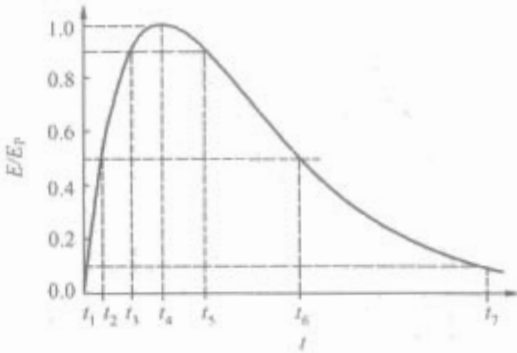


图 9.1-33 双指数型脉冲波形主要特征

关于高空核爆炸电磁脉冲辐射环境的描述，近几年来多采用以下的场强表达式

$$E(t) = kE_p(e^{-at} - e^{-\beta t}) \quad (9.1-6)$$

式中： $k = 1.3$ ； $E_p = 50\text{kV/m}$ ； $a = 4 \times 10^7 \text{s}^{-1}$ ； $\beta = 6 \times 10^8 \text{s}^{-1}$ 。

表 9.1-12 两种双指数型脉冲波形特征参数对比

表达式	$E(t) = kE_p(e^{-at} - e^{-\beta t})$	
原式序号	(9.1-4)	(9.1-6)
k	1.05	1.3
$E_p/\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$	50	50
a/s^{-1}	4×10^6	4×10^7
β/s^{-1}	4.76×10^8	6×10^8
t_r/ns	4.1	2.5
t_f/ns	550	55
t_p/ns	10.1	4.8
t_{hw}/ns	184	23
$W_T/\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	0.983	0.193

2) 标准规定。20 世纪 80 年代以来，美国军用标准在提出设备和分系统的瞬态电磁场辐射敏感度控制要求时，所规定的电磁脉冲试验信号波形参数曾做过以下变更：1986 年 8 月 4 日发布的美国军用标准 MIL-STD-461C，其中规定的电磁脉冲峰值场强 $E_p = 50\text{kV/m}$ ，上升时间 $t_r \approx 5\text{ns}$ ，脉宽 $t_D \approx 30\text{ns}$ （见图 9.1-33， $t_D = t_5 - t_3$ ）， $t_f \approx 550\text{ns}$ 。而取代这一标准的 MIL-STD-461D 于 1993 年 1 月 1 日发布时，将上述规定改为：电磁脉冲试验信号波形的峰时 $t_p \leq 10\text{ns}$ ，从峰时算起的衰落时间 $t_{pf} \geq 75\text{ns}$ （见图 9.1-33）， $t_{pf} = t_7 - t_4$ 。1999 年 8 月 20 日发布的 MIL-STD-461E，则将脉冲上升时间改为 $1.8 \sim 2.8\text{ns}$ ，半峰宽度改为 $23\text{ns} \pm 5\text{ns}$ 。

美国于 1997 年 3 月 18 日发布的军用标准 MIL-STD-464

《系统电磁环境效应要求》，它作为美国国防部协调有关军标的界面标准，其中规定的双指数型自由场电磁脉冲环境标准采用了与式 (9.1-6) 相同的表达式。

3) 高空核爆炸在地面附近产生的电磁场。核电磁脉冲环境 (E_1 、 E_2 和 E_3) 如图 9.1-34 所示，高空核爆炸在地面附近产生的电磁场由三部分组成，第一部分常用图中的 E_1 表示，为瞬发 γ 信号，将其展开画出即式 (9.1-6) 所描述的双指数型脉冲。它是由爆炸释放的瞬发 γ 与大气作用，产生康普顿效应形成的，所形成的场占统治地位的时间约为 $1\mu\text{s}$ 。从 $1\sim 100\mu\text{s}$ ，由前向散射 γ 产生的场更为重要，如图 9.1-34 中的 E_{2a} 散射 γ 信号所示。瞬发 γ 信号和散射 γ 信号通常表现为平面波。从 $1\sim 10\text{ms}$ ，占统治地位的场则是由高能中子与空气分子的原子核非弹性碰撞产生的 γ 形成的，如图 9.1-34 中的 E_{2b} 中子 γ 信号所示。这段时间内电磁脉冲的产生机制因大地的存在而受到强烈的影响， E_{2b} 垂直分量的大小如图 9.1-34 所示。最后，从大约 $1\sim 100\text{s}$ ，被电离和加

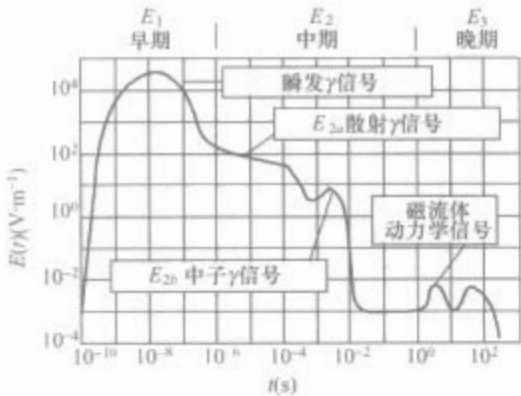


图 9.1-34 核电磁脉冲环境 (E_1 、 E_2 和 E_3)

表 9.1-13 高功率微波、超宽带和高空核电磁脉冲的主要参数

类 别	高功率微波	超宽带	高空核电磁脉冲
天线处峰值功率 P_{pm}	100MW~20GW	几 GW~20GW	50 000TW
脉冲半峰宽 t_{bw}	<10ns~1 μs	< 10ns	$\approx 20\text{ns}$
上升时间 t_r (10%~90%)	10~20ns	< 1ns	1~5ns
脉冲源输出能量 W_g	100J~20kJ	5~500J	10^6GJ
覆盖频带	500MHz~10GHz	100MHz~50GHz	0~200MHz
不同距离处—100m 能量密度—1km —10km	$1\mu\text{J}/\text{m}^2\sim 200\text{J}/\text{m}^2$ $10\text{mJ}/\text{m}^2\sim 2\text{J}/\text{m}^2$ $0.1\text{mJ}/\text{m}^2\sim 0.2\text{J}/\text{m}^2$	$8\text{nJ}\sim 1\mu\text{J}$	$120\mu\text{J}$ $120\mu\text{J}$ $120\mu\text{J}$
不同距离处—100m 功率密度—1km —10km	$1\text{W}/\text{m}^2\sim 200\text{MW}/\text{m}^2$ $10\text{mW}/\text{m}^2\sim 2\text{MW}/\text{m}^2$ $0.1\text{mW}/\text{m}^2\sim 200\text{kW}/\text{m}^2$	(2~100) W	600W 600W 600W
不同距离处—100m 峰值电场—1km —10km	(20~300) kV/m (2~30) kV/m (0.2~3) kV/m	(4~20) kV/m	50kV/m 50kV/m 50kV/m
重复率	单个短脉冲 或 (10~250) Hz	单个短脉冲 或几 Hz~几十 Hz	单个短脉冲
照射面积	<1km ²	<10km ²	$5\times 10^6\text{km}^2$
作用距离	直至几十 km	<100m	—
辐射方法	天线	天线或规则爆炸	核爆炸

(2) 频谱特性。

1) 高功率微波电磁脉冲的典型波形如图 9.1-35 所示，其对应的频谱幅度如图 9.1-36 所示。它的时域波形类似一个门控的正弦波信号，典型的频率一般在 200MHz~5GHz，脉冲持续时间达到几个 ms，脉冲波形具有重复性，脉冲频

率的武器碎片及被俘获的空气在地磁场中运动，感应形成了大地中的电场，这种效应产生的场被称为磁流体动力学电磁脉冲，如图 9.1-34 中 E_3 。 E_3 部分所示的电场水平分量，将对系统产生强耦合。

2.1.4 其他电磁脉冲

(1) 波形参数。

1) 超宽带电磁脉冲。超宽带是指百分比带宽值在 163.4% 和 200% 之间或带宽比大于 10 的信号或波形，而百分带宽比是相对于中心频率的波形带宽，当中心频率是高端频率和低端频率的平均值时，百分带宽比具有最大值 200%，百分带宽比一般不用于表示具有很大直流分量的信号，如高空核电磁脉冲，带宽比是指包含 90% 能量区域的高端频率和低端频率的比值。

2) 短脉冲是指上升时间和脉冲持续时间在 ps 或 ns 量级的瞬变信号，具有极宽的频谱成分。

3) 高功率微波是高功率电磁环境的一部分，典型的高功率微波是指源的脉冲峰值功率超过 100MW 的窄带信号，随着高功率微波源技术的发展，其峰值功率达到了 GW 级。

4) 表 9.1-13 对高功率微波、超宽带和高空核电磁脉冲的主要参数作了归纳。由表中数据可见，高功率微波和超宽带没有严格的界限，作为武器，后者也可认为是一种专门采用超宽带和短脉冲技术的高功率微波武器。超宽带不需要利用二极管去产生电子束和经波导一类电磁结构去产生微波，而是利用超快电路直接激励的方法（脉冲功率源）去产生纳秒级超短脉冲，从而获得超宽带电磁辐射输出，其频谱更宽，而脉冲源输出的能量相对要低一些。

率可随时间改变，并能进行调制。不同频率对不同的电子设备具有不同的破坏效果，有些设备和系统（如工作在不同频率的雷达）在特定的频率下容易产生谐振而烧毁。

2) 超宽带/短脉冲瞬变高功率电磁脉冲的典型波形如图 9.1-37 所示，其对应的频谱幅度如图 9.1-38 所示。与窄带

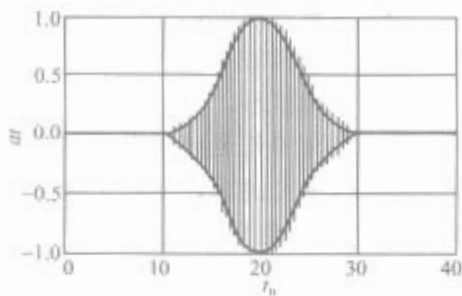


图 9.1-35 高功率微波电磁脉冲的典型波形

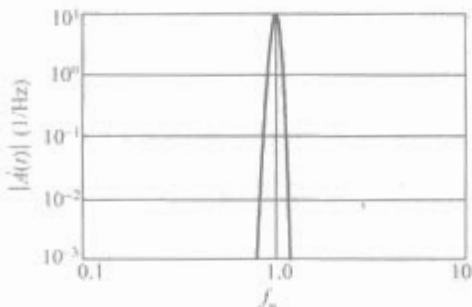


图 9.1-36 高功率微波电磁脉冲的频谱幅度

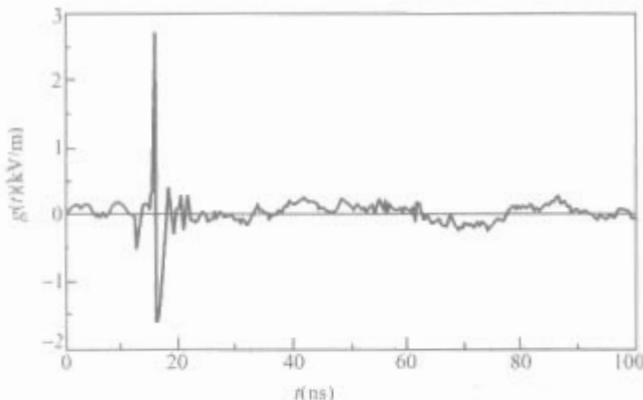


图 9.1-37 超宽带/短脉冲瞬变高功率电磁脉冲的典型波形

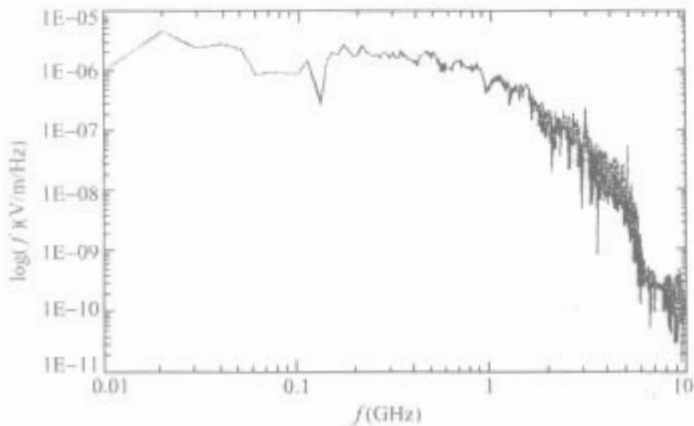


图 9.1-38 超宽带/短脉冲瞬变高功率电磁脉冲的频谱幅度图

的高功率微波不同，这种波形更像是一种双极性脉冲，它覆盖很宽的频率。描述这种脉冲的方式有高斯脉冲和双指数脉冲，这与研究高空核爆炸产生的电磁脉冲相类似。

2.2 电磁脉冲效应

直击雷的冲击电流达数千 kA，对电子设备和建筑物等均具有巨大的破坏作用，因此需要采用专业的引雷、防雷措施，避免电子设备和建筑物遭受直击雷的打击。除直击雷外，雷电的辐射电磁脉冲、高功率微波、超宽带与高空核电磁脉冲对电子系统的耦合途径相类似，尤其是当入射波的波长与系统的特征尺寸相近时，将产生共振现象，使耦合大大增强。

核电磁脉冲、快上升前沿电磁脉冲、超宽带电磁脉冲同为电磁脉冲信号，但在产生机理及波形参数上有较大的区别，由此所引起的电磁脉冲效应也有较大的差异。

1) 核电磁脉冲伴随核爆炸而产生，它具有幅值强、频率高、范围广等特点。经过数十年的研究，人们对核电磁脉冲及其效应的认识较为深刻。

2) 快上升前沿电磁脉冲是指上升前沿在亚纳秒级，脉宽在几十纳秒的电磁脉冲信号。它的提出是效应核武器发展的产物，核武器的发展使得其电磁脉冲效应更加显著，电磁脉冲的上升前沿更快，频谱更宽，对电子系统的破坏更严重。

3) 超宽带电磁脉冲是指上升前沿在亚纳秒级，脉宽在几纳秒内的电磁脉冲信号。它的提出则完全是脉冲功率技术发展的产物。与核电磁脉冲、快上升沿电磁脉冲相比，超宽带的频谱更宽、高频成分更丰富。超宽带还有一个更显著的特点，即超宽带较容易实现无载波发射，发射效率也较高。

2.2.1 电磁脉冲的天线耦合

在电磁脉冲环境中运行的电子、电力系统，电磁脉冲能量可通过各种耦合途径进入系统，这些耦合途径主要有：天线对电磁能量的收集；电线、电缆的耦合与传导；电磁脉冲对设备壳体的穿透，通过金属壳体上缝、孔、洞的耦合以及金属框架、管道等的结构耦合。

电磁脉冲对电子、电力系统的耦合包含辐射耦合和传导耦合两种类型。辐射耦合是指电磁脉冲能量以电磁辐射方式通过空间对系统形成的耦合。其耦合方式主要有电磁脉冲对天线的耦合、对电缆等长导体的耦合、对孔洞与缝隙的耦合等。传导耦合则是指电磁脉冲能量以电压或电流形式通过金属导体或元件（如电容器、变压器）对系统形成的耦合。

(1) 单极子天线。受到电磁脉冲辐射场（例如高空核电磁脉冲）作用的柱状导体，包括鞭状短天线、金属引线、接插件等，当其尺寸远远小于电磁脉冲上限频率分量的波长，可按单极子或偶极子天线作近似分析。电子、电气设备中由金属导体构成的环路，包括印制板中的回路在内，当其环路尺寸远远小于电磁脉冲上限频率分量的波长时，可按磁偶极子天线作近似分析。单极子天线与偶极子天线及其准静态等效电路如图 9.1-39 所示。图中单极子天线的长度为 l ，偶极子天线的长度为 $2l$ ，天线的半径为 a ；入射电磁脉冲电场强度为 E_i ，电场 E_i 和天线的夹角为 θ ； $V_o(t)$ 为等效电路的源电压，它等于天线的开路电压 $V_{oc}(t)$ ； Z_L 为负载阻抗， Z_A 为天线输入阻抗。 Z_A 近似为

$$Z_A \approx \frac{1}{j\omega C_A} \quad (9.1-7)$$

式中： C_A 为天线的等效电容。

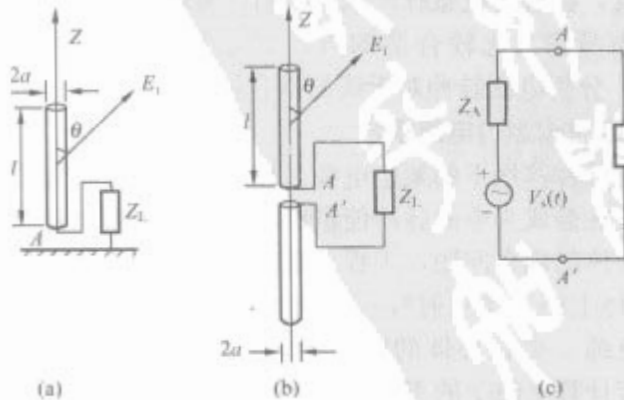


图 9.1-39 单极子天线与偶极子天线及其准静态等效电路

(a) 单极子；(b) 偶极子；(c) 等效电路

对于单极子天线, C_a 近似为

$$C_a = \frac{2l}{cZ_0} \quad (\text{F}) \quad (9.1-8)$$

式中: $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$; $Z_0=60 [2\ln(2l/a) - 2] (\Omega)$ 。

对于偶极子天线, C_a 近似为

$$C_a = \frac{l}{cZ_0} \quad (\text{F}) \quad (9.1-9)$$

等效电路中源电压为

$$V_s(t) = V_{\infty}(t) = E_i(t)l_e \cos \theta \quad (\text{V/m}) \quad (9.1-10)$$

式中: l_e 为天线有效长度。对于单极子天线, $l_e=l/2$; 对于偶极子天线, $l_e=l$ 。

在频域, 对入射电磁脉冲场的上限频率 ω_H , 当 $Z_L \ll (1/\omega_H C_a)$ 时, 负载近似于短路, 其电流为

$$I_L(t) \approx E_i(t)l_e C_a \cos \theta \quad (9.1-11)$$

当 Z_L 为纯电容性负载 C_L 时, 负载上的电压降为

$$V_L(t) = \frac{C_a}{C_L + C_a} E_i(t)l_e \cos \theta \quad (9.1-12)$$

(2) 磁偶极子天线。由环状导体形成的典型环路及其等效电路如图 9.1-40 所示, 当环的半径 r 远小于入射波的波长 λ , 可视为磁偶极子天线。设环路面积为 S , 等效电感为 L , 负载阻抗为 Z_L , 电磁脉冲磁场 H_i 与环路法线的夹角为 θ , 则环路的感生电动势即开路电压为

$$V_{\infty}(t) = \mu_0 S \frac{dH(t)}{dt} \cos \theta \quad (9.1-13)$$

式中: $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 为自由空间磁导率。

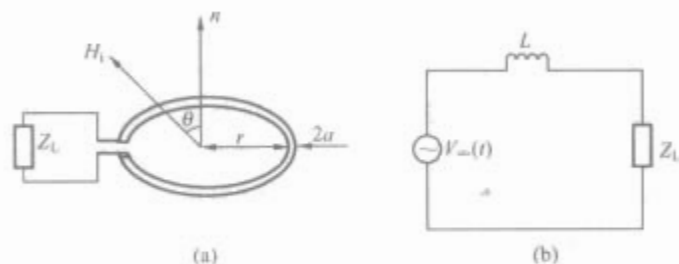


图 9.1-40 典型环路及其等效电路
(a) 典型环路; (b) 等效电路

由等效电路, 在频域负载上的压降为

$$V_L(\omega) = j\omega\mu_0 S H(\omega) \cos \theta \frac{Z_L}{j\omega L + Z_L} \quad (9.1-14)$$

对入射电磁脉冲场的上限频率分量 ω_H , 当 $Z_L \gg \omega_H L$, 有

$$V_L(t) \approx V_{\infty}(t) = \mu_0 S \frac{dH(t)}{dt} \cos \theta \quad (9.1-15)$$

(3) 其他形式的天线。当天线的尺寸较大或脉冲的上限频率较高且其波长与天线的尺寸相当时, 就不能简单地采用偶极子天线作近似了, 需要采用数值计算方法进行计算。船上普遍采用的中波、短波、超短波鞭状天线以及不同形式的雷达天线, 在进行电磁脉冲耦合分析计算时, 均不能按偶极子天线来考虑。比较合适的方法是采用时域有限差分法 (FDTD) 分析电磁脉冲对天线的耦合特性。

2.2.2 电磁脉冲的电缆耦合

电磁脉冲作用下的架空电缆、埋地电缆和金属管道等长导体, 往往会成为电磁脉冲能量的收集器。关于电磁脉冲对这类长导体的耦合问题, 工程上常按传输线理论作近似分析 (忽略导体上的二次辐射), 这样不仅可按一维问题处理, 而且对于电缆一类长导体的耦合计算, 所给出的精度是足够的。随着计算电磁学的不断发展和微型计算机计算能力的不断提高, 将电缆等长导体的耦合作为电磁散射问题作时域全波分析已成为可能。在边界条件确定, 对精度有较高要求的场合, 可采用诸如时域有限差分 (FDTD) 法一类的数值方

法作精确分析。在按传输线理论作近似计算时, 可先求得长导体上感应电流、电压的频域表达式, 然后通过傅里叶反变换得到电流、电压的时域波形。

理论计算表明, 当有限长近地电缆暴露于高空核电磁脉冲环境中, 其外导体感应电流将遵循以下规律:

1) 对长度为几十米的电缆, 其外导体上的感应电流随长度的增加而增加, 在两端开路情况下, 感应电流波形为衰减振荡, 振荡周期随长度的增加而增加。

2) 电缆沿地面敷设时, 其外导体上的感应电流比相同条件下架高 10m 以上的电缆大得多。在电缆因终端开路致使感应电流出现振荡的情况下, 振荡的衰减速度随架高的增加而减小, 振荡周期亦随架高的增加而减小。

3) 水平极化波沿垂直于电缆的方向入射时, 电缆外导体上感应电流的峰值随入射仰角 ψ 的增加而增加, $\psi=90^\circ$ 时达到最大。

4) 对地面电缆而言, 终端失配时, 同一根电缆上距终端不同位置处感应电流波形不同, 电缆上的同一位置在端接不同负载时的波形亦不同。

在大型水平极化波电磁脉冲模拟器辐射场中对近地电缆进行电磁脉冲模拟试验, 结果如图 9.1-41 所示。图中给出了架高 3.5m、长度为 40m 电缆两端均开路及一端开路、一端接地时其中点处外导体感应电流波形, 计算波形和实测波形在峰值、振荡周期及衰减特性方面均具有较好的一致性。

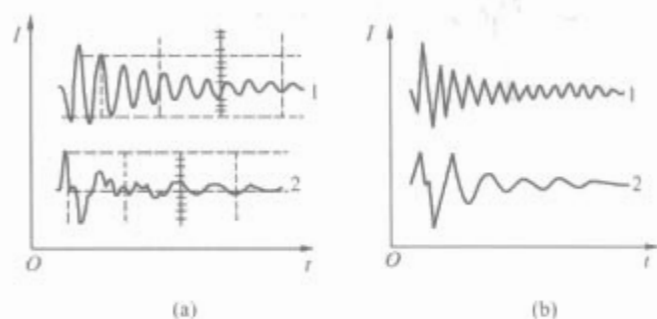


图 9.1-41 高空核电磁脉冲作用下架高电缆, 其中点处外导体感应电流波形
(a) 测试结果; (b) TL 近似算法计算结果
(曲线 1 为两端开路的结果; 曲线 2 为一端开路、一端接地的结果)

2.2.3 电磁脉冲理想导体的矩形目标腔体耦合

利用时域有限差分法可以比较方便地研究超宽带、快上升前沿电磁脉冲、核电磁脉冲通过孔缝对目标腔体的耦合规律。下面以一个理想导体的矩形目标腔体为例进行说明。目标腔体的几何尺寸为 $0.12\text{m} \times 0.12\text{m} \times 0.12\text{m}$, 腔体壁厚 0.003m。腔体的中央开有 $0.018\text{m} \times 0.018\text{m}$ 的矩形小孔, 孔面对来波方向。腔体的周围是吸收边界, 用于截断计算空间, 它对于反射波是透明的。计算空间模型如图 9.1-42 所示。

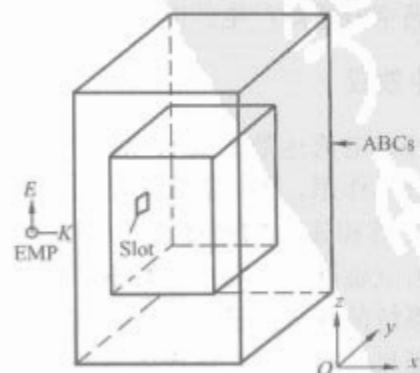


图 9.1-42 计算空间模型

入射快上升沿电磁脉冲为双指数脉冲, 电场垂直极化; 其脉冲幅度为 103V/m , 上升前沿时间为 0.3ns , 脉冲宽度约为 50ns 。入射核电磁脉冲为双指数脉冲, 电场垂直极化; 其脉冲幅度为 103V/m , 上升前沿时间为 10ns , 脉冲宽度约为 50ns 。入射超宽带为高斯脉冲, 电场垂直极化; 其脉冲幅度为 103V/m , 上升前沿时间为 0.3ns , 脉冲宽度约为 0.6ns 。入射脉冲电场时域波形如图 9.1-43 所示。

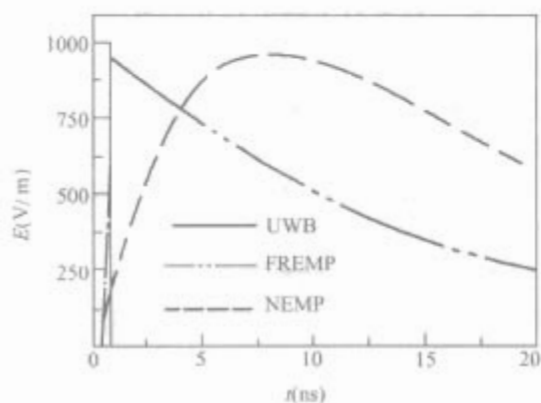


图 9.1-43 入射脉冲电场时域波形

2.2.3.1 超宽带对目标腔体的孔缝耦合特性

图 9.1-44 为超宽带通过小孔耦合进入屏蔽腔体内的信号波形, 它的位置在腔体内小孔轴线上, 距小孔距离可变化。说明超宽带通过小孔耦合进入腔体, 并与腔体发生了孔腔共振。图 9.1-45 反映的是腔体中心位置孔腔共振的频谱分布, 在该处耦合信号已经衰减得很小了, 只剩下了谐振信号。可以看出, 共振信号主谐振峰的频率为 $1.7\sim 1.8\text{GHz}$, 这正与腔体谐振频率的主模式相吻合, 后面几个谐振峰也分别与腔体谐振频率的较高次模式相吻合。

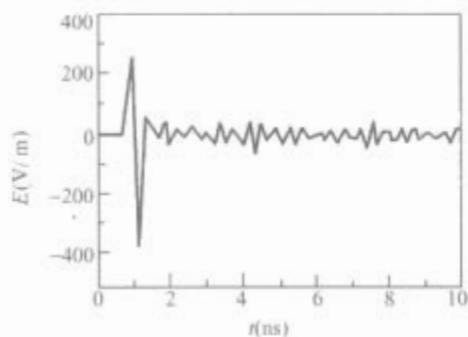


图 9.1-44 超宽带通过小孔耦合进入屏蔽腔体内的信号波形

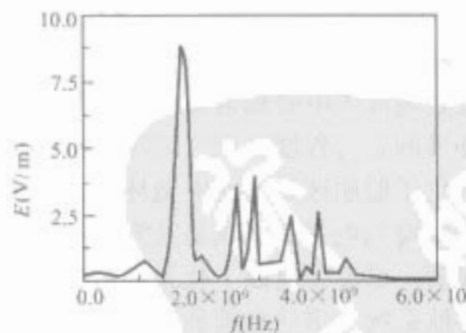


图 9.1-45 超宽带通过小孔耦合进入屏蔽腔体内孔腔共振的频谱分布

2.2.3.2 快上升沿电磁脉冲对目标腔体的孔缝耦合特性

图 9.1-46 为快上升沿电磁脉冲通过小孔耦合进入屏蔽腔体内的信号波形, 它的位置在腔体内小孔轴线上, 距小孔 6mm 。从图中可以看到, 在所构造的屏蔽体和小孔尺寸条件下, 快上升沿电磁脉冲的波头很容易耦合进入腔体, 而波尾基本上无法进入腔体。即快上升沿电磁脉冲的高频分量基本上都能耦合进入腔体, 而其低频分量被腔体截止。脉冲波

在腔体内衰减得很快, 脉冲场主要集中在孔缝附近。从图 9.1-46 还可以看到, 在主脉冲结束后, 出现了高频振荡信号且其幅度并不随距小孔距离变化, 说明快上升沿电磁脉冲通过小孔耦合进入腔体, 并与腔体发生了孔腔共振。从图 9.1-47 可以看出, 共振信号的主谐振峰频率为 $1.7\sim 1.8\text{GHz}$, 这正与腔体谐振频率的主模式相吻合, 后面几个谐振峰也分别与腔体谐振频率的较高次模式相吻合。

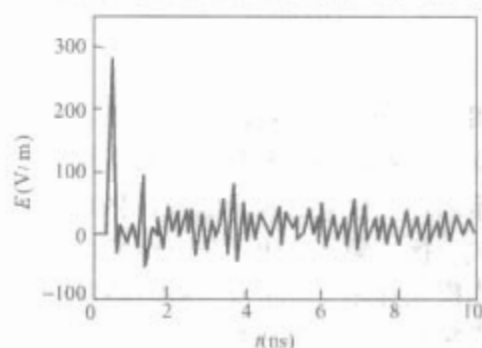


图 9.1-46 快上升沿电磁脉冲通过小孔耦合进入屏蔽腔体内的信号波形

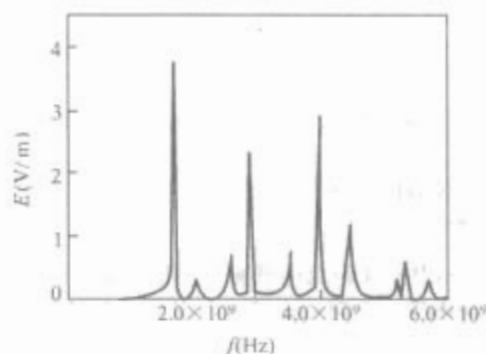


图 9.1-47 快上升沿电磁脉冲通过小孔耦合进入屏蔽腔体内孔腔共振的频谱分布

2.2.3.3 核电磁脉冲与目标腔体的孔缝耦合特性

图 9.1-48 为核电磁脉冲通过小孔耦合进入屏蔽腔体内的信号波形, 它的位置在腔体内小孔轴线上, 距小孔 6mm 。从图中可以看到, 在所模拟的目标体尺寸下与超宽带、快上升沿电磁脉冲相比, 核电磁脉冲基本上无法通过小孔进入腔体内部。其耦合场的幅值要比超宽带、快上升沿电磁脉冲耦合场的幅值小 $15\sim 20$ 倍。并且脉冲波在腔体内衰减得很快, 脉冲场主要集中在孔缝附近。而且核电磁脉冲无法与目标体发生有效的孔腔共振。从图 9.1-49 可以看出, 共振信号的主谐振峰频率为 $1.7\sim 1.8\text{GHz}$, 这与腔体谐振频率的主模式相吻合, 后面几个谐振峰也分别与腔体谐振频率的较高次模式相吻合。

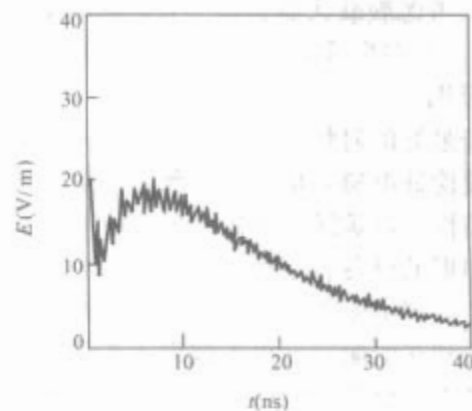


图 9.1-48 核电磁脉冲通过小孔耦合进入屏蔽腔体内的信号波形

2.2.4 电磁脉冲对电子设备的危害效应

通过各种渠道耦合进入系统中设备金属壳体内部的高功率

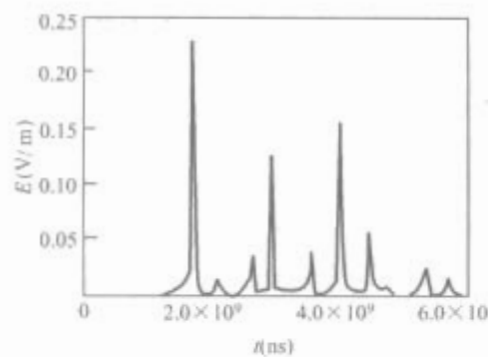


图 9.1-49 核电磁脉冲通过小孔耦合进入屏蔽腔体内孔腔共振的频谱分布

微波、超宽带和高空核电磁脉冲能量，将对电子器件产生破坏效应，造成干扰、翻转、闭锁甚至烧毁，使其功能下降以至失效。毁伤模式有热二次击穿，瞬时热效应引起的金属化失效，电压击穿和复杂波形引起的其他失效。失效的严重程度与功率密度有关，高功率微波的效应见表 9.1-14。

表 9.1-14 电子系统对不同功率密度高功率微波的效应

高功率微波 功率密度	效 应
(0.01~1) mW/cm ²	雷达和通信设备产生强干扰，设备不能正常工作
(0.01~1) W/cm ²	使通信、雷达、导航等系统的微波电子设备失效或烧毁
(10~100) W/cm ²	壳体产生瞬态电磁场，并进入壳体内部电路，产生感应电压，出现功能紊乱、误码、逻辑混乱，甚至永久失效
(10 ³ ~10 ⁴) W/cm ²	强场作用，引起许多非线性效应，产生微观力学效应或非常吸收，可在短时间内毁坏目标

3 射频电磁环境效应

3.1 船舶射频电磁环境

射频电磁环境的场强分布呈现非均匀性。以船舶为例，其场强分布的非均匀性由船舶上各辐射源的布置特点所决定。首先，雷达电子战等微波大功率干扰源布置于船舶平台上部（桅杆、上甲板部位），而短波、超短波等大功率干扰源布置于船舶平台较低部位；其二，通常情况下，船舶平台尾部区域主要布置接收系统，首部区域主要布置发射系统；第三，船舶上各种大功率辐射源的峰值功率和平均功率差异极大。因此，研究射频电磁环境的幅值特性应结合船舶战术和工作任务（考虑舰载武器装备、人员活动范围、燃油等的电磁安全性），并根据我方资源、任务规定及敌人的威胁特点来研究其范围。

为了保持最好的射频电磁环境界限电平，必须在船舶设计过程中反复论证电磁环境。根据舰上辐射设备的频谱、功率、极化等特性，对暴露在甲板面上或可能受到舰上各种通信和雷达波照射的设备和军械，其外部的电磁环境必须满足相关规定。美国军用标准 MIL-STD-464 对船舶甲板上工作的外部电磁环境和在船舶发射机主波束下工作时的外部电磁环境作了非常详细的要求，包括每一个频段的峰值场强和平均值场强，频率在 10kHz~45GHz，幅度在 6~27 460V/m 不等。

3.2 强电磁辐射源

3.2.1 电磁辐射源的分类

船舶所处的射频电磁环境较为复杂，它是由多个有意辐

射源产生的辐射电磁能的复合场，主要辐射源是装载于船舶平台上的大功率发射机，包括：高频通信发射机、甚高频通信发射机、超高频通信发射机、卫星通信发射机、对空搜索雷达、对海监视雷达、对海导航雷达、对空监视雷达、武器引导雷达、电子战干扰机、敌我识别问答器、战术空中导航自动归航无线电信标（塔康系统）。船用发射机是有意发射期望的射频能量，同时在船舶平台内，存在着电气机械部件产生的人为干扰，有意引入的来自友方外部射频发射源的能量（即通信和导航），而在大部分情况下，还有来自敌方的监视、干扰以及电磁脉冲武器产生的能量等。

船舶强电磁干扰源的基本特性是舰上各种传感器特性的复合体现，具有一般辐射源的基本特性，即辐射频段、功率、方向性和波形等辐射特性。

3.2.2 船舶强电磁辐射源的频谱特性

现代船舶装备的无线电设备和传感器越来越多，它们构成了舰上许多电磁系统，其中包括通信、导航、雷达和电子战等系统。舰载电磁干扰源的频谱特性是船舶电磁辐射的主要特征量。一般而言，每个电磁干扰源都拥有特定的工作频段或频谱特性，不同的系统有不同的工作频段。它们彼此相接和相叠构成船舶强电磁干扰源的频谱特性，其分布从几百千赫兹到十几个吉赫兹。表 9.1-15 列出了船舶主要电子设备的工作频段及辐射功率。

表 9.1-15 船舶主要电子设备的工作频段及辐射功率

设备名称	工作频段 (MHz)	辐射功率 (W)
中波发射机	0.4~3	100 左右
短波发信机	2~30	2000 左右
对海电台	30~90	100 左右
对空电台	100~180, 220~400	100 左右
VHF 电话	155 左右	25 左右
米波警戒雷达	160 左右	20 000 左右
数据链通信	450 左右	50 左右
战术通信	200~800	50 左右
超短波干扰机	100~1000	2000 左右
对海警戒雷达	3000~6000	200 000 左右
对空警戒雷达	3000~6000	500 000 左右
导航雷达	10 000 左右	20 000 左右
炮瞄雷达	10 000~13 000	300 000 左右
电子战干扰机	2000~4000 8000~18 000	1000 左右

3.2.3 船舶强电磁辐射源的功率特性

功率特性是表征强电磁辐射源的一个重要指标，其直接影响到电磁环境的恶劣程度。现代船舶的整体辐射功率在增加，这不仅恶化了船舶区域内的电磁环境，而且提高了船舶所在海区电磁环境的电平。特别是某海区有船舶编队时，这种现象更加显著。船舶强电磁干扰源辐射的功率主要产生于通信系统、导航系统、雷达系统和电子战系统，不同频段辐射的功率不同，其大小分布从几十瓦到几百千瓦。由此可见，短波发信机、电子战干扰机和雷达系统辐射的功率较大，它们辐射功率的总和占船舶总辐射功率的 95% 以上。特别是雷达系统传感器具有较强的方向性，对辐射能量进行聚焦调制，使得在主波束照射的方向上辐射功率大大增加。

3.2.4 船舶强电磁辐射源的方向性

船舶辐射源的方向性不仅与辐射传感器的几何结构和工作频率相关，而且还与船舶的上层结构相关。

(1) 鞭状或偶极子式的天线。在高频、甚高频和超高频段，船舶上多采用上述天线形式。其在自由空间里的方向性

在H面是全向的,在E面是“∞”形,当这些天线布置于船舶上时,它们与上层建筑之间产生了电磁相互作用。由于上层建筑的二次辐射效应,对天线的辐射方向性产生了影响,其方向图曲线会出现不同程度的凹陷,频率越高这种现象越严重。严格地说,鞭状或偶极子式天线的方向图表征了船舶辐射源在高频段的辐射方向性。因此在分析舰上某根高频天线方向性时,应视为在分析船舶辐射源在高频段的方向性。当船舶上有多根这类天线同时工作且工作频率不同时,它们的方向图不会产生干涉效应,仅仅是相互重叠和互补。

(2) 微波天线。微波天线具有很强的方向性,例如火控雷达具有针状方向性,搜索和警戒雷达在俯仰面具有 $\csc^2\theta$ 形式的方向性。船舶上的雷达在其工作的空间区域很少受到上层建筑的遮挡,方向图形状(特别是主波束)一般不受上层建筑的影响,在H面呈准全向性特点。多个雷达方向图的集合就形成了船舶辐射源在微波段的辐射方向性。

舰上电磁干扰源辐射电磁波的波形不尽相同,有正弦波形、调制波形和脉冲波形。前两种波形通常用于信息传输和数据通信,后者常用于雷达系统,但也有例外,如连续波雷达等。对整个船舶而言,在某一时刻空间辐射电磁波的波形包括以上3种,因此可以认为船舶辐射源的波形特点是正弦波形、调制波形和脉冲波形的集合。

3.3 电磁辐射危害的确定

电磁辐射危害通常由船舶上人员活动区、燃油排注区、电引爆军械及电子武器装备敏感系统布置区(统称为关键区域)电磁综合场强的分布特性、电磁耦合途径及大小和电磁危害的安全限值三个方面来确定。

各关键区域的电磁综合场强由船舶上短波、超短波、微波等大功率辐射源在考虑船舶上层建筑影响下的近场分布,从而获取船舶甲板及附近区域的综合电磁环境,最后参考辐射危害标准计算而获得。

3.3.1 船舶甲板及附近区域的综合电磁环境预测

准确获取舰载短波、超短波和微波辐射源在舰甲板区域产生的电磁环境,宜根据具体情况采用不同的方法。

(1) 短波和超短波电磁环境的预测。通常,短波和超短波电磁环境的预测可采用矩量法及其加速算法、矩量法(MoM)和物理光学(PO)混合方法等进行精确求解,也可采用有限元(FEM)、时域有限差分(FDTD)、频域有限积分(FD)、边界元(BEM)、传输线法(TLM)等,另外,采用缩尺模型预测法也是一种有效的途径。

(2) 微波天线的辐射近场预测。对于各式微波天线的辐射近场,应根据雷达天线的形式及其口径周围的结构物形状,选用高频近似数值方法求解,通常有基于射线寻迹类方法(GO、GTD、UTD、SBR)和基于电流的方法(PO、PTD、ITD)或采用两者混合方法如PO+GTD、PO+UTD等。上述各种方法在理论上十分成熟,通过适当的工程验证和改进,可运用于船舶各类辐射体的近远场预测。

(3) 船舶甲板及附近区域的综合电磁环境预测。综合场强一般是指空间某点处或空间某区域中的合成电磁场强度。针对船舶实际电磁环境问题,综合场涉及以下两方面的因素:①船舶甲板区域以及其他附近区域的实际空间电磁场往往是一种由多辐射源共同产生的合成电磁场,而不是像一个典型的单一电磁场那样,具有固定的频率和极化方向;②船舶电磁环境对人员、武备、燃油的安全性有直接的关系。从射频安全性角度来讲,人员、武备、燃油对电磁环境的响应不仅限于某个频率或某个方向的环境电磁场,而是与合成电

磁场的强度有关。

一旦获得船舶单辐射源在甲板及附近区域的电磁场分布,即可运用相关分析方法预测舰艇综合电磁(场强)环境。

对两个或两个以上频率的电磁波复合在一起的场强,从保守设计的原则出发,目前最普遍采用的方法是采用平方和的根作为综合场强值,其值为各单个频率场强平方和的根值,可以用下式表示

$$E^2 = \sum E_n^2 \quad (9.1-16)$$

式中: E 为复合场强, V/m; E_1 、 E_2 、 \dots 、 E_n 为各单个频率所测得的场强, V/m。

对各不同极化方向的场强值,合成场为

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2 \quad (9.1-17)$$

从合成规律特点看,上述合成方法主要强调了能量的叠加,除此以外还有一些合成的处理方法,比如采用矢量叠加的方法进行合成。

3.3.2 电磁耦合计算

电磁耦合的大小直接决定了系统内和系统间是否发生电磁干扰,同时也为定量评估人员、燃油、电子敏感设备及电引爆军械的电磁安全性提供数据和参考。电磁耦合按耦合方式可分为场的耦合和电路的直接传导耦合两类,按耦合作用的范围可分为系统间耦合和系统内耦合,按耦合模式可分为共模和差模。按耦合途径可分为:空间场的耦合(电场、磁场、电磁场,包括天线间、机柜辐射、二次辐射体等),公共阻抗耦合(包括地回路)——共模/差模转换,场—电缆共模耦合——共模/差模转换;场—导线差模耦合;线—线耦合;电源线耦合(共电网传导)。

在船舶上的短波天线处在相互的近场中,不能采用远场公式来计算这种互耦,而采用矩量法可以将这种近场耦合问题转换成多端网络的功能传输问题,利用矩阵运算求出整个系统的耦合系数矩阵,从而得出各对天线之间的耦合度 C 为

$$C = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{inc}} \frac{P_{inc}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{inc}} \frac{1}{1 - |\Gamma|^2}, \frac{P_{out}}{P_{inc}} = C(1 - |\Gamma|^2) \quad (9.1-18)$$

式中: P_{inc} 为入射到发射天线的功率; P_{in} 为在发射天线端的净输入功率; P_{out} 为在接收天线端的净输出功率; Γ 为发射天线端的复电压反射系数。

增加收发天线的间距可以减小天线至天线的耦合,可是船舶上允许安装天线的地方是很有限的。问题最严重的是在短波波段,此波段耦合电平较高,在一艘驱逐舰上短波耦合度可以由-10dB变化到-56dB,超短波天线间的耦合度可在-30~-50dB间变化。

船舶天线耦合特性可以采用缩尺模型法、粗略分析法和数学模型法等方法确定,这些方法提供的数据具有不同的精度。

(1) 缩尺模型法。缩尺模型预测技术的理论基础是麦克斯韦电磁场理论,模型天线与原天线量间的相互关系见表9.1-16。根据模型天线理论得出的表9.1-16中原天线与模型天线各量间的关系,我们可以从模型天线的场强分布推算出原天线的场强分布。在模型上测出模型天线的场强 E_1 ,求出系数 a ,由式 $E_1 = E/a$ 便可以得出原天线的场强为 $E = aE_1$,表中系数 a 由下式确定

$$a = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{P_{入射} \eta}{P_{1入射} - P_{1反射}}} \quad (9.1-19)$$

式中： $P_{\text{入射}}$ 为原天线发射机的输出功率； η 为原天线天调及发射系统的效率； $P_{\text{入射}}$ 为模型天线的入射功率； $P_{\text{反射}}$ 为模型天线的反射功率。

表 9.1-16 模型天线与原天线量间的相互关系

增益函数	$g_1(\theta, \phi) = g(\theta, \phi)$
长度	$l_1 = l/n$
时间	$t_1 = t/n$
电场	$E_1 = E/a$
磁场	$H_1 = H/b$
电压	$u_1 = u/(na)$
电流	$I_1 = I/(nb)$
频率	$f_1 = nf$
波长	$\lambda_1 = \lambda/n$
阻抗	$Z_1 = Z$
总功率	$P_1 = P/(n^2ab)$

如果发射机至天线的电缆较长，在计算原天线的辐射功率时，还要考虑电缆的损耗系数。实船的近场场强为

$$E = aE_1 = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{P_{\text{入射}} \eta}{P_{\text{入射}} (1 - \Gamma_{\text{TV}}^2)}} E_1 \tag{9.1-20}$$

(2) 耦合的粗略分析。本方法未考虑传播介质及天线间结构的吸收或附近结构体散射产生的影响，它是由自由空间传播方向推导得出的。常用的粗估远场耦合度的公式如下

$$C = P_R + R_T = -(32 + 20\lg d + 20\lg f) + G_T + G_R \tag{9.1-21}$$

式中： d 为天线间距，km； f 为频率，MHz； G_T 为发射天线增益，dB； G_R 为接收天线增益，dB。

近场的耦合度预测公式

$$C = -18.5 - 20\lg(d/\lambda) + \alpha f_{\text{TX}} + \alpha f_{\text{RX}} \tag{9.1-22}$$

式中： d 为天线间距，m； λ 为波长，m， αf_{TX} 为发射天线系数； αf_{RX} 为接收天线系数。

上面叙述的计算耦合度的方法只是对于间距大于或等于一个波长、天线长度等于或小于半个波长时才有效。在更普遍的情况下，可利用数学模型法进行计算机预测。

(3) 数学模型法。最普遍适用的数学模型是耦合度矩量法模型。考虑任意加载和激励，对脉冲函数来说，应认为是分别对每一小段激励和加载，图 9.1-50 示出一典型小段 Δl_i ，用施加的电压 V'_i 激励，并用集总阻抗元件 Z_{Li} 加载。量 V'_i 和 Z_{Li} 代替该装置的戴维南等效源及加在小段 Δl_i 上的负载。假定有 N 个被激励和被加载的小段，而总的小段数为 n ，则矩阵方程为

$$[I] = [Y'_L][V'] \tag{9.1-23}$$

$[I]$ 、 $[V]$ 、 $[V']$ 是 N 之列矩阵， $[Y'_L]$ 、 $[Z]$ 、 $[Z']$ 是 $N \times N$ 方阵，并且

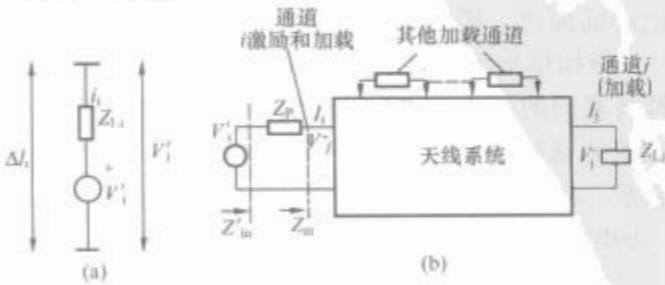


图 9.1-50 天线耦合度矩量模型
(a) 一个典型加载和激励小段；(b) 天线耦合

$$\left. \begin{aligned} y'_{Lij} &= Y'_{Lij}, u_i = V_i, u'_i = V'_i \\ y_{ij} &= Y_{ij}, i_i = I_i, z_{Lj} = Z_{Lj} \end{aligned} \right\} \quad (i, j \leq n) \tag{9.1-24}$$

因此，由通道 i 到通道 j 的耦合度为

$$C_{ij} = \frac{-P_j}{P_i} = \frac{|Y'_{Lji}|^2 R_e(Z_{Lj})}{R_e(Y'_{Lji}) - |Y'_{Lji}|^2 R_e(Z_{Lj})} = \frac{|Y'_{Lji}|^2 R_e(Z_{Lj})}{R_e(Y'_{Lji})} \tag{9.1-25}$$

3.3.3 船舶通信系统的干扰耦合及计算

(1) 基本原理。通信系统包括甚低频、中波、短波、甚高频、超高频的收发信机等子系统，通信子系统原理框图如图 9.1-51 所示。

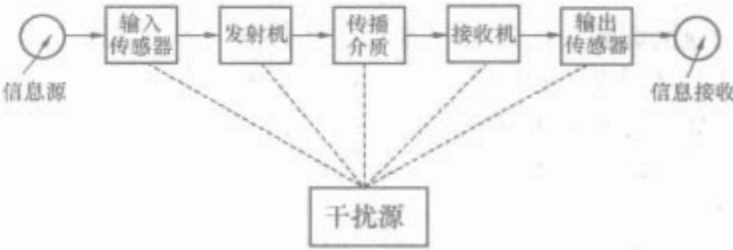


图 9.1-51 通信子系统原理框图

图 9.1-51 中信息源是各个子系统要传送的话音、数据、图像等信息，输入传感器是将物理模拟信息变换为电信号，它可以是麦克风、磁带录音机的磁头、电传机、编码器或计算机输出部件等，输出传感器是将接收机输出的电信号变换为原始的信息形式（声音、数据或图像），它可以是耳机、扬声器、电传机、绘图仪、打印机、解码器或计算机输出部件。干扰源包括传播中的衰落、敌方干扰、己方各子系统的相互干扰等。各子系统内和子系统间的干扰一般包括以下 3 个方面：

- 1) 同频道干扰。它是指频率落在接收机中频带宽内的干扰。
- 2) 邻频道干扰。它是指频率在中频带宽以外，射频带宽以内的干扰。
- 3) 带外干扰。它是指频率大大超出接收机射频带宽的干扰，如镜像频率干扰。

根据收、发设备间频率的对应情况，对通信系统各子系统内和子系统间通常分为四种类型进行估算：

- 1) 发射机基波发射和接收机基波响应，干扰余量记为 FIM，称为基波干扰余量。
- 2) 发射机基波发射和接收机杂波响应，干扰余量记为 TIM，称为发射机干扰余量。
- 3) 发射机杂波发射和接收机基波响应，干扰余量记为 RIM，称为接收机干扰余量。
- 4) 发射机杂波发射和接收机杂波响应，干扰余量记为 SIM，称为杂波干扰余量。

以上四种类型中，1) 为同频干扰，2)、3)、4) 为带外干扰。

设发射机的输出功率为 P_T ，天线隔离度为 L 。因为 $L = P_T/P_A$ ，所以 $P_A = P_T/L$ ，取分贝 (dB) 值时

$$P_A = P_T - L \tag{9.1-26}$$

$$IM = P_T - L - P_R \tag{9.1-27}$$

当 $IM < 0\text{dB}$ 时可兼容工作； $IM = 0\text{dB}$ 时处于临界状态； $IM > 0\text{dB}$ 时不能保证电磁兼容。

(2) 短波收发系统和超短波收发系统干扰余量 (IM) 的计算。短波宽带发信系统对某全波收音机的干扰示意图如图 9.1-52 所示。



图 9.1-52 短波宽带发信系统对全波收信机的干扰示意图

1) *FIM* 计算实例。短波宽带发射机基波发射功率 $P_T = 1000\text{W} = 60\text{dBm}$ ，计算可知 24 号与 2 号天线隔离度为 40dB ，全波接收机灵敏度 $P_R = 0.5\text{ }\mu\text{V} = -6\text{dB}\mu\text{V} = (-6 - 107)\text{dBm} = -113\text{dBm}$ ，所以 $FIM = 60 - 40 - (-113) = 133\text{dB}$ ，显然存在严重的同频干扰。

接收机最大输入电压阈值 $= 100\text{V} = 10^8\text{ }\mu\text{V} = 160\text{dB}\mu\text{V} = 53\text{dBm}$ ，短波宽带发射机基波发射在接收机输入端的功率 $P_A = 60 - 40 = 20\text{dBm} < 53\text{dBm}$ ，所以接收机不会毁损。

又接收机阻塞电平阈值 $= 120\text{dB}\mu\text{V} = 13\text{dBm}$ ，因 $P_A = 20\text{dBm} > 13\text{dBm}$ ，所以会产生接收机阻塞干扰。

以上分析说明，当收发设备同频率时，不仅会产生干扰，而且会使接收机阻塞，因此短波通信系统应避免收发设备同频工作。事实上，在船舶的有限空间内，设备间同频干扰是显见的，它可通过频率管理消除，因此一般不认为同频干扰是主要干扰。

2) *TIM* 计算实例。当发射机基波对准接收机杂波响应时，接收机敏感度阈值 $= P_R + 100 = -13\text{dBm}$ ，此处 P_R 基础上加上 100dB 的抑制（考虑了最大的抑制），所以 $TIM = 60 - 40 - (-13) = 33\text{dB}$ 。

TIM 是指发射机基波对准接收机杂波响应，对超外差接收机，杂波响应是指收发频率满足 $|pf_{LO} \pm qf_{发}| = f_{IF}$ 条件时接收机的响应，式中： f_{LO} 是本振频率； f_{IF} 是中频； p 为本振谐波次数； q 为发射谐波次数。此时 $q=1$ ，所以只要通过频率管理使上述条件不满足，就可大大减小 *TIM*，使其小于零，不产生干扰。

3) *RIM* 计算实例。根据资料，一般发射机杂波抑制为 -55dB ，当发射机杂波对准接收机基波响应时，发射机在接收机输入端的功率 $P_A = 60 - 40 - 55 = -35\text{dBm}$ ，所以 $RIM = P_A - P_R = -35 - (-113) = 78\text{dB}$ ，存在严重干扰，但因为 $P_A < 53\text{dBm}$ ，不会烧毁接收机；而且 $P_A < 13\text{dBm}$ ，也不会产生接收机阻塞干扰。

RIM 是指发射机杂波发射对准接收机基波，这里发射机杂波指谐波，非谐波的杂波很小，不予考虑。所以尽管计算的 $RIM > 0$ ，但通过频率管理，使接收机频率与发射机谐波频率错开，就可使 $RIM < 0$ ，从而不产生干扰。

4) *SIM* 计算实例。当发射机杂波发射对准接收机杂波响应时， $P_A = 60 - 40 - 55 = -35\text{dBm}$ ， $P_R = -113 + 100 = -13\text{dBm}$ ，所以 $SIM = P_A - P_R = -35 - (-13) = -22\text{dB}$ ，对接收机不产生干扰且有 22dB 的安全裕量。

3.3.4 雷达电子战系统间干扰计算

由于雷达电子系统中的仪器设备数目剧增且天线一般处于扫描状态，其电磁干扰预测显得越来越重要。雷达电子战系统间电磁干扰计算机预测的基本思想是用数学定量关系表达该三要素，即根据理论分析建立数学模型，然后将三要素模型按一定要求组合后，借助计算机程序获得各种潜在电磁干扰的数值结果，从而判断干扰源发射的电磁能量是否会影响敏感设备以及系统是否工作在兼容状态。雷达系统间干扰计算涉及到干扰噪声比模型、传输损耗模型、接收机—发射

机耦合损耗模型、脉冲灵敏度降低模型、发射机频谱模型、接收机响应模型、接收机灵敏度模型、天线方向图模型和干扰概率模型。

(1) 干扰噪声比。对于同时工作的两部雷达，将其分为干扰雷达（源雷达）和受害雷达。在受害雷达接收机一方，其接收的干扰信号功率与其固有噪声功率之比，称为干扰噪声比，为

$$INR = P + G_s + G_r - L_P - L_S - L_I - L_B \quad (9.1-28)$$

式中： INR 为干扰噪声比； G_s 、 G_r 分别为发射机、接收机天线增益； L_P 为自由空间传输损耗； L_S 为极化及系统损耗； L_I 为带外发射引起的功率下降； L_B 为带宽修正； P 为发射机峰值功率。

由于两部雷达的天线通常处于扫描工作状态，式 (9.1-28) 中的天线增益是统计的参数，其可变性决定了概率。

(2) 传输损耗。传输损耗包含自由空间损耗和其他因素对电波传播的影响，如地面反射、大气影响及对流层散射等。自由空间损耗可表示为

$$L_P = 32 + 20\lg R + 20\lg f \quad (9.1-29)$$

(3) 接收机—发射机耦合损耗模型。接收机与发射机耦合来自于源和受害者之间由于频率偏移引起的衰减，它涉及源的发射频谱和受害接收机的频率响应，该衰减由下式确定

$$L_{Mc}(\Delta f) = -10\lg \frac{\sum_i S(f_i - \Delta f) H(f_i)}{\sum_i S(f_i) H(f_i)} \quad (9.1-30)$$

式中： f_i 为受害接收机响应范围内的频率； Δf 为源和受害接收机之间的频偏； S 为发射机频谱； H 为接收机响应。

(4) 脉冲灵敏度降低模型。脉冲灵敏度降低模型是接收机对脉冲响应的一种描述。对接收机而言，脉冲达到峰值的过程是非常短暂的，用于降低接收机对非常短暂脉冲的敏感性的数据为

$$\begin{cases} L_{Pd} = -20\lg(B_r \tau_1) & B_r \tau_1 < 1.0 \\ L_{Pd} = 0 & B_r \tau_1 \geq 1.0 \end{cases} \quad (9.1-31)$$

式中： B_r 为接收机带宽； τ_1 为发射机脉冲宽度。

(5) 发射机频谱模型。发射机频谱模型用于近似表示源发射机频谱，特别是不可能得到测量数据的情况。例如，MasonZimmerman 频谱模型确定的结果常用于下列三种条件下的情形：

1) 若 $\Delta f < 1/\pi\tau$ ，则 $S_{MZ} = 0$ 。

2) 若 $\Delta f < \frac{1}{\pi\tau_1}$ 和 $\Delta f \geq \frac{1}{\pi\tau_1}$ ，则 $S_{MZ} = 20\lg(\Delta f \pi \tau_1)$ 。

3) 若 $\Delta f \leq \frac{1}{\pi\tau_1}$ 和 $\Delta f \geq \frac{1}{\pi\tau_1}$ ，则 $S_{MZ} = 40\lg(\Delta f \pi \tau_1) + 20\lg(\tau_1/t_1)$ 。

式中： Δf 为频率偏移（绝对值）； τ_1 为发射机脉冲宽度， t_1 为发射机脉冲上升时间； S_{MZ} 为频谱幅度。

(6) 接收机响应模型。接收机响应模型用于近似表示当不可能得到受害接收机测量数据时，其对干扰的响应特性可由三阶巴特沃思带通滤波器给出，并可用下式计算

$$H = 10\lg \left[1 + \left(\frac{f - f_0}{B_r} \right)^{2N} \right] \quad (9.1-32)$$

式中： B_r 为接收机带宽； f_0 为接收机调谐频率； f 为被评价的响应频率； N 为滤波器阶数（一般取 $N=3$ ）。

当接收机有一个镜频时，用每个频率 f 计算两个响应值 H_1 和 H_2 。 H_1 由 f_0 计算， H_2 在镜频上计算，此时 H 应取 H_1 和 H_2 中的较小值。

(7) 接收机灵敏度模型。接收机灵敏度常被定义为接收

机内部噪声

$$N_r = 10 \lg (FKTB) \quad (9.1-33)$$

式中: F 为接收机噪声系数; K 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度; B 为接收机带宽。

(8) 天线方向图模型。对于工作在微波频段的雷达, 其天线通常为抛物面天线, 绝大多数在水平方向上为针状波束。在天线增益已知的前提下, 可由下式计算天线的主波束宽度

$$BW^\circ = \sqrt{\frac{30\,000}{G}} = 173 \left(\frac{1}{G} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9.1-34)$$

或

$$BW^\circ \approx 70 \frac{\lambda}{D} \quad (9.1-35)$$

式中: G 为 $(G_{\text{dB}}/10)$ 的反对数; λ 为波长; D 为抛物面直径。

常用的天线量化方向图有两种, 即 2 级钥匙形天线方向图和 4 级钥匙形天线方向图。很显然, 4 级近似的精度稍高一些。

(9) 干扰概率模型。雷达天线处于扫描工作状态时, 天线增益及增益之和均应假定为随机变化

$$\hat{G} = \hat{G}_s + \hat{G}_r \quad (9.1-36)$$

式中: G_s 、 G_r 分别表示源天线和受害天线主波束增益。

定义 C 为天线之间的耦合损耗, 即

$$\hat{C} = \hat{G}_s + \hat{G}_r - \hat{G}_s - \hat{G}_r \quad (9.1-37)$$

则有

$$\hat{INR}_T = \hat{INR} - \hat{C} \quad (9.1-38)$$

式中: \hat{INR}_T 为总的干扰噪声比, 相当于一统计参量; \hat{INR} 为考虑天线耦合损失的干扰噪声比。

因为 \hat{INR} 是随时间变化的, 当 \hat{INR} 达到某一定值时, 受害雷达才会受到干扰, 因此必然存在一个干扰概算, 其意义是受害雷达受到干扰的平均时间与扫描一周的时间之比

$$P_i = P_r(\hat{INR}_T \geq T) \quad (9.1-39)$$

式中: T 为检测门限的 50% 概率。则

$$P_i = P_r(\hat{C} \leq \hat{INR} - T) = F_c(\hat{INR} - T) \quad (9.1-40)$$

式中: F_c 为关于 \hat{C} 的累积的概率分布函数

$$F_c(C) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{\lfloor C \rfloor} P_c(k) & C \geq 1 \\ 0 & \text{其他情况下} \end{cases} \quad (9.1-41)$$

因干扰频率 P_i 是指一个干扰脉冲被受害接收机检测出的概率, 每秒的干扰脉冲数为

$$NP = P_i \cdot PRF \quad (9.1-42)$$

式中: NP 为每秒检测出的脉冲数; PRF 为源的系统脉冲重复率。

若 NP 足够小, 以至于受害雷达能允许且仍然能执行其功能时, 表明源雷达和受害雷达是兼容。否则, 应将 NP 用于分析以确定受害雷达的降级情况。

3.3.5 船舶舱室内设备间干扰耦合计算

通常情况下, 形成干扰的途径一般分为以下 4 种方式。

(1) 通过共电源方式形成传导耦合途径。共电源耦合模型描述了多台设备共用同一电源而产生的相互耦合, 当此设备与其他设备相连时, 此传导发射直接通过电网耦合到其他设备的电源输入端, 即通过共电源方式形成传导耦合。

(2) 通过机柜辐射方式形成辐射耦合途径。机柜辐射耦合模型描述了多台设备处于同一空间时, 通过机壳向外的电磁辐射对敏感设备产生的直接干扰量大小。在标准考核中, RE01 (RE101)、RE02 (RE102) 项 (25Hz~100kHz 为磁场辐射, 10kHz~18GHz 为电场辐射) 等确定了设备的辐射发射大小, 机柜辐射传输模型通常用电流源模型来等效。

若要考虑镜像, 只需找出镜像点, 写出源点和像点在空间产生的总场, 然后利用上述相同的方法, 计算机柜的电磁辐射。

(3) 通过场线耦合方式形成耦合途径。场线耦合干扰传输模型计算场对单根电缆的耦合量, 针对不同的电缆类型建立多种场到电缆的耦合模型, 基本上适合计算所有的场线耦合。

由于根据传输线理论推导含端接条件的场线耦合传输线模型时, 只有在阻抗匹配和均匀平面波激励的条件下才能得到闭合形式。而在实际情况下, 端接阻抗和传输线特性阻抗很难匹配, 激励场不可能是均匀平面波, 甚至传输线都有可能是不均匀的, 因此, 针对工程需要, 可简化为低频近似模型, 这种模型将场对线的作用等效为在线上产生感应电源, 磁场产生感应电压源, 电场产生感应电流源, 像线到线的耦合那样, 可以将耦合分为感性成分和容性成分。

(4) 通过电缆耦合方式形成耦合途径。针对敏感设备与各种不同的电缆相连, 除了通过共电源线耦合、场线耦合外, 还有一种情况是电缆之间的互耦, 即与敏感设备端口所连电缆相邻的电缆 (存在传导电流或感应电流等构成的电流源)。另外, 屏蔽层的接地状况会影响容性耦合和感性耦合, 因此, 模型还需输入屏蔽层接地状态 (单点或多点)、屏蔽层数 (单层或双层) 等, 这些参数对屏蔽电缆耦合计算很重要。

3.4 电磁危害的安全限值

3.4.1 电磁辐射对人员的危害

(1) 人员暴露的射频危害。恶劣的电磁环境和过量的电磁辐射是工作人员人身安全和身体健康的重要隐患。大量科学实验表明, 大于 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 的高功率密度以明显的热效应为主。长时间接触高功率密度的辐射, 可以造成机体损伤甚至死亡。短时间接受高功率密度辐射, 可引起眼睛的损伤, 易发生白内障。在低于 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 的低功率密度下, 热效应不起主要作用。长时间接触低功率密度的辐射, 动物的神经系统、造血系统和细胞免疫功能会受损害。另外, 辐射对遗传、生育和致畸也会产生影响。

(2) 电磁辐射射频灼伤危害。在各种系统密集的环境中, 由电磁辐射引起的射频灼伤是对船上人员独特的危害。射频灼伤是附近高频发射的能量进入上层建筑金属构件上 (如支柱、中柱、船舷栏杆、起重吊钩、系艇杆、索具、管道和电缆等) 自然耦合的结果, 金属结构固有的电特性具有截获电磁能量的作用, 并在电路阻抗中将产生电流和电压。在高频时, 电流分量足够大, 当电感的感抗和电容的容抗相等时就产生谐振, 于是产生了最大电压; 因偶然机会与射频激励的金属体相碰, 则发出火花或灼伤。在电磁辐射场中, 物体上开路射频电压以射频灼伤测试结果为基础, 射频电压超过 140V 便被认为具有危害性。

3.4.2 电磁辐射对燃油的危害

电磁辐射可以在金属体上产生感应电压，当电压达到一定值时就会击穿介质，产生电弧和火花。火花是在分离的两个金属触点间形成的，若在两触点间存在着足以维持这火花的能量，便引起点火，从开启的油箱中取出金属加油喷管时，就常发生这种情况。当密闭油罐中低压蒸气的液体燃料受到扰动时，该扰动使非导体燃料产生电荷，在容器内引起静电放电，如油罐内燃料的蒸气和空气混合物达到一定比例时，将会引起爆炸。

辐射天线附近的辐射场强能足以感应出由电弧和火花引燃所需要的能量。使燃料蒸气点燃，必须同时具备以下三个条件：

(1) 对于一个给定的环境温度，燃料蒸气和空气混合的比率必须恰当。

(2) 电弧和火花必须具有大于或等于 0.25mJ 的能量，为点火提供适当的温度。

(3) 为了维持在电弧中的热量，必须要有大于或等于 0.5mm 的电弧间隙，以便能点燃火焰。当电弧间隙太短时，不能点火。

点燃油所需的能量限值是 50VA。燃油蒸气和空气混合物燃点是由电弧火花点燃能量决定的，而电弧是由射频能量对形成间隙的两金属感应的结果。燃油点燃的门限值 50VA 是处在辐射场中的加油装置终端的开路电压与短路电流的乘积。50VA 的安全标准可换算成加油装置处所需的场强安全阈值。

3.4.3 电磁辐射对电引爆军械的危害

关于射频辐射能量对军械系统危害问题，研究表明：电爆管有可能由于暴露在射频场中而发生误引爆，因此射频辐射对军械系统危害问题引起了广泛的重视。

(1) 针对船舶上的武备可能在强电磁场环境中储备、运输、安装和使用，进行的一系列实验说明，电引爆军械的起爆机理主要有三种：热、电弧和冲击波。利用桥丝的直流焦耳热 (I^2R) 是典型的引爆型，其动作值决定于电流大小和初级炸药的起爆特性。由射频耦合到引线上引起桥丝热及由周围介质加热能引起自爆。电弧型发生在电压高于 25V，通常用于碳桥和细薄膜电爆管。冲击波形要求电压高于 300V 以产生强烈冲击波，直接引起二次强烈爆炸。大多数电爆管的动作，取决于电气激励的幅度，不同电压下电爆管动作方式见表 9.1-17。

表 9.1-17 不同电压下电爆管动作方式

电爆管形式	激励电压		
	低 (1~2V)	中 (25~50V)	高 (>300V)
碳桥	焦耳热	电弧	冲击波
导电薄膜	焦耳热	电弧	冲击波
导电混合物	焦耳热	电弧	冲击波
高阻线	焦耳热	焦耳热	冲击波
低阻线	无	焦耳热	冲击波
半导体	无	焦耳热	电弧
火花放电器	无	电弧	冲击波

(2) 这种最危险的耦合出现在：

1) 电爆装置作为单独组件组装、拆卸和测试。

2) 军械进行维修、保养或更换零件、部件时的拆除。

3) 使用连接器连接到军械部件上连续检验电阻值的测试以及其他测试。

4) 暴露的非屏蔽或未经滤波器的电雷管、爆炸螺栓以

及其他火工品导线。

5) 暴露的非屏蔽军械部件，如火箭发动机、弹头和引线等。

3.5 射频辐射源的近远场计算

船舶射频辐射源的近远场计算有很多方法，但均可归纳为数值计算方法和解析法（或半解析法），工程上运用较多的传统方法还有粗略估算和实验验证进行修正相结合的方法。数值计算方法是随着计算机技术的发展而得到广泛应用，尽管当前计算机技术和计算电磁学理论飞速发展，但对于船舶这样的复杂系统平台，特别是辐射近场问题，目前还没有一种数值方法能完全求解，大多数情况下运用混合方法（低频精确方法、高频近似方法、高低频混合等）、区域求解方法，再辅以实验验证进行船舶的辐射近远场求解。

3.5.1 电磁场场域划分及特点

(1) 射频辐射源的电磁场通常分为近场和远场。电磁场的近场又可分为感应近场和辐射近场。通常，当天线尺寸小于其工作波长时，天线周围产生的主要是感应近场；当天线尺寸大于工作波长时，天线近处产生的主要是辐射近场。而电子设备机壳泄漏电磁场视其泄漏信号频率及泄漏部位情况可呈现感应近场或者辐射近场的特点。

(2) 近区场的主要特性概括起来有以下几点：

1) 在电小天线辐射的近区，电场与磁场的相位相差 90° ，平均能流密度矢量为零。近区场可以看成是感应场。

2) 在感应场中，感应的情况不仅与场源性质及耦合方式有关，而且还取决于被感应导体的状况、所在位置以及周围的环境条件，近区场的场强分布很复杂，感应体的存在会扰动原来的电磁场分布。

3) 在感应场中，波阻抗与场源的相关性很强且是频率的函数。近区场的电场强度和磁场强度既可由测量得到，也可由远区场的测量数据用球面波展开法转换为近场数据。

4) 点源辐射的近区场是球面波，不能用平面波的方法处理，需要用球面波展开法分析。

5) 对于口径尺寸 $D>\lambda$ 的情况，其辐射的感应近区场幅度和相位分布是没有起伏的，但辐射的近区场是有起伏的。

(3) 远区场的主要特性可概括如下几点：

1) 在自由空间，远区辐射场接近于平面波，计算远区场与坐标系选择无关。

2) 在远区，电场和磁场是同相位的，它们的方向都与波的前进方向垂直，电场与磁场是共面的，平均坡印廷矢量不为零。

3) 电场与磁场的比值是恒定的，即为 $120\pi\approx376.7\Omega$ 。

4) 远区场的幅度随距离增加而单调下降。

3.5.2 射频辐射源的近远场计算

3.5.2.1 解析计算方法

(1) 近场区。从麦克斯韦方程式出发，限于正弦电磁场和线性、各向同性的均匀媒质情况，满足辐射条件下，求解非齐次赫姆霍兹 (Helmholtz) 方程，即可获得辐射电磁场

$$E(r)=\frac{1}{4\pi}\int_{\Sigma}\{(U_n\times E)\times\nabla\varphi-j\omega\mu(U_n\times H)\varphi+\frac{1}{j\omega\mu}[(U_n\times H)\cdot\nabla]\nabla\varphi\}dS\quad(9.1-43)$$

$$H(r)=\frac{1}{4\pi}\int_{\Sigma}\{(U_n\times H)\times\nabla\varphi+j\omega\mu(U_n\times E)\varphi-\frac{1}{j\omega\mu}[(U_n\times E)\cdot\nabla]\nabla\varphi\}dS\quad(9.1-44)$$

式中： $\varphi=\exp(-jkr)/r$ ； $\nabla\varphi=\left(-jk+\frac{-1}{r}\right)[\exp(-jkr)$

$/r]U_r$; 且有

$$(J \cdot \nabla) \nabla \varphi = \left[-k^2 (J \cdot U_r) U_r + \frac{2}{r} \left(jk + \frac{1}{r} \right) \right. \\ \left. (J \cdot U_r) U_r - J \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \right] \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (9.1-45)$$

在辐射源邻近处, 辐射场的积分表示式不作任何近似。事实上, 积分本身对邻近点的解也是近似的, 因为忽略了边界条件。式(9.1-43)、式(9.1-44)可以用来求解任何一个理想导电的散射体上所感应的电流辐射场, 如果散射体的形状可以与坐标系吻合, 那么感应电流 J 就可以严格求解, 否则只能近似求解。对于大型尺寸的散射体, 可采用矩量法求解, 但此时也受到计算机容量的限制, 难以得到精确解。

(2) 过渡区。对于求解的场, 当 r 足够大时, 使式(9.1-45)的第一项有较好的近似, 通常规定从近场区到散射体或天线的距离为 $2D^2/\lambda$ 处称为费涅尔区 (D 为散射体的最大线尺寸)。

在费涅尔区的场计算中可作如下近似:

1) 式(9.1-45)括号内的 l/r 项与 $k = 2\pi/\lambda$ 相比可以忽略不计。

2) $\cos(U_n, U_R) = \cos(U_n, U_r)$ 。

3) $\cos(U_n, U_S) \approx 1$, (U_n, U_S) 是法线方向与口径相位线之间夹角。

4) 幅度项中 $1/R \approx 1/r$ 。

5) 相位项 $\exp(-jkr)$ 中, r 的变化近似为线性项与平方项之和, 即

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + Z^2} \approx Z + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2Z}$$

式中: ξ, η 为散射体上某点的坐标。

(3) 辐射远区。又称为弗朗霍弗 (Fraunhofer) 区, 从离辐射源距离为 $2D^2/\lambda$ 一直到无穷远处, 在这个区域内, 辐射场的积分可作如下近似:

1) $r \rightarrow R$ (除相位项外)。

2) $r \rightarrow R - \rho \cdot U_R$ (相位项)。

3) $\psi \rightarrow e^{-jkR} \cdot e^{jk\rho \cdot U_r} / R$, $\nabla \psi \rightarrow jke^{-jkR} \cdot e^{jk\rho \cdot U_r} / R \cdot U_R$ 。

4) $(J_s \cdot \nabla) \nabla \psi \rightarrow \frac{-k^2 (J \cdot U_R)}{R} e^{-jkR + j\rho \cdot U_R} U_R$ 。

于是远场区可表示为

$$E(r) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi R} e^{-jkR} \int_S \left\{ \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} (U_n \times E \times U_R) + \right. \\ \left. [U_n \times H - (U_n \times H \cdot U_R) U_R] \right\} e^{jk\rho \cdot U_R} dS \quad (9.1-46)$$

$$H(r) = -\frac{j\omega\epsilon}{4\pi R} e^{-jkR} \int_S \left\{ -\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} (U_R \times H \times U_R) + \right. \\ \left. [U_n \times E - (U_n \times E \cdot U_R) U_R] \right\} e^{jk\rho \cdot U_R} dS \quad (9.1-47)$$

通常说的远场区是在离辐射源很远处, 或在无穷远处观察到的场。对于口径尺寸大的天线, 在测量中, 将 $2D^2/\lambda$ 作为远场区近似的最小距离, 规定这一最小距离是基于口径辐射条件, 即对于一个等相位分布的辐射口径, 其最大尺寸为 D 。在远场区, 其轴线上与边缘的相位差小于 $\pi/8$ 或 $\pi/16$, 用这一准则, 即是认为远场区是从距离天线 $2D^2/\lambda$ 处一直延伸到无穷远处。应当指出, 对于天线最大尺寸远小

于波长的电小天线而言, 其远场区的极限距离规定为 $\lambda/6$, 即当 $r \ll \lambda/6$ 的区域作为近区, 而 $r \gg \lambda/6$ 的区域称作远区。此处所指极限距离 $\lambda/6$ 是表示波的相位改变 1 个弧度所相应的距离。

以上定义三个区域是基于求解散射场的积分引出的近似处理。由于天线近场中有金属障碍物的存在, 会使天线的近场分布发生改变。显然, 对于各种不同的频率其影响有明显差别, 在高于金属障碍物 (垂直线度) 谐振频率和低于金属障碍物谐振频率的频段, 障碍物对天线近场的影响较小; 而金属障碍物在谐振频率附近, 对天线近场的影响很大, 此时金属障碍物附近的场强有时甚至可增大到同天线近场相近的程度, 而且金属障碍物接地时比不接地时对天线近场的影响大得多。此外, 金属障碍物的直径变粗, 会使其近场变小且具有较明显的遮蔽作用, 使得金属障碍物后面的场强减弱。

对于通常采用的口径天线而言, 在辐射近场区, 由于天线口径上各面元到达主波束轴上接收点的距离不同, 因而各面元在接收点处形成的场强存在相位差, 此相位差在辐射远场区是不存在的。随着接收点与天线距离的变化, 该相位差也相应地变化, 因而造成了天线近场增益的变化和幅度分布的起伏。在远场区, 天线的方向图是确定的, 天线方向性只是角度的函数, 与距离无关。而在辐射近场区内, 天线的方向图不是确定的, 对于不同的距离具有不同形状的方向图, 即天线的方向性不但是角度的函数, 而且也是距离的函数。对于距离天线为 $2D^2/\lambda$ 处, 其功率增益与远场功率增益误差通常为 1%; 对于距离天线为 D^2/λ 处, 功率增益误差通常为 5%。根据不同的要求, 辐射近场的界限可选为 $2D^2/\lambda$ 或 D^2/λ , 由于大口径天线的采用和工作频率的提高, 往往使近场区延伸至很大的距离, 使得在远场区测试天线方向图愈来愈困难。通过对天线近场方向图进行研究, 可以预测天线远场的方向图。

3.5.2.2 微波功率密度估算公式

(1) 远场区主波束轴线上功率密度计算。在远场区主波束轴线上功率密度可由式(9.1-48)得出, 为

$$S = \frac{GP_T}{4\pi d^2} \quad (9.1-48)$$

式中: S 为功率密度的数值, W/m^2 ; G 为天线远场增益; P_T 为天线辐射功率的数值, W ; d 为测点到天线口径面距离的数值, m 。

(2) 近场区功率密度估算。

1) 对于均匀照射的喇叭和反射面天线等大辐射体, 辐射近场区的最大功率密度值可以用式(9.1-49)估算为

$$S_m = \frac{4P_T}{A} \quad (9.1-49)$$

式中: S_m 为辐射近场区功率密度值, W/m^2 ; P_T 为天线辐射功率, W ; A 为天线的口径面积, m^2 。当不存在反射时, 估算值与实际值相差通常在 $\pm 3dB$ 之内; 当存在反射时, 实际最大功率密度值有可能增到估算值的 4 倍。

2) 矩形口径雷达近场功率密度估算。在辐射近场区, 近场功率密度值由式(9.1-50)和式(9.1-51)得出, 为

$$S_m = \frac{P_T G_f}{4\pi d^2} \quad (9.1-50)$$

$$G_f(dB) = G_0(dB) - K_H - K_V \quad (9.1-51)$$

式中: S_m 为辐射近场区功率密度的数值, W/m^2 ; P_T 为天线辐射功率的数值, W ; G_f 为天线近场增益; $G_f(dB)$ 为天线

近场增益, dB; d 为测点到天线口径面距离, m; G_0 为天线远场增益, dB; K_H 为水平增益修正, dB; K_V 为垂直增益修正, dB。

3.6 电磁场数值计算方法概述

作为电磁学的重要分支, 电磁分析与电磁计算是根据 Maxwell 方程, 利用适当的边界条件确定所关心区域或物体内的电磁场分布或电流分布, 进而给出所需要的物理参量。

(1) 近似方法可分为两类。一类基于偏微分方程, 另一类基于积分方程。以高频近似为例, 几何光学理论 (GO)、几何绕射理论 (GTD) 以及一致性几何绕射理论 (UTD) 是建立在 Maxwell 微分方程基础上的; 而物理光学法 (PO) 及物理绕射理论 (PTD) 则是以积分方程为基础的。高频方法有一个共同点, 即利用了电磁波在高频时类似于光波特性。例如, 几何光学理论利用费马定理 (Fermat) 给出了高频渐近解的主项, 而几何绕射理论补充了渐近解的高阶项。

(2) 高频近似方法的最大优点是不用生成矩阵且计算速度快, 从而极大地节省了计算机资源。因此, 它们广泛地应用于电大尺寸物体的辐射场及散射场 (包括雷达散射截面) 计算。然而, 近似方法具有很大的局限性: ①其应用范围有限, 不能处理非常复杂的物体; ②近似方法在绝大多数情况下只能计算远场区。但是, 许多实际问题需要知道近场区与内场 (或电流) 分布。因此, 近似方法仍不能满足很多工程问题的需要。

(3) 数值方法分类。电磁分析与电磁计算的第三个发展阶段是数值方法时代。由于其强有力的适应性与通用性而得到了蓬勃发展, 涌现出很多有效的计算方法。例如时域有限差分法 (FDTD)、矩量法 (MOM)、有限元法 (FEM) 及边界元法 (BEM) 等。特别是随着计算机内存的不断增长和计算速度的不断增快, 随着计算算法的深入研究, 计算电磁学已发展成为一门非常重要的学科, 它在很多工程领域的作用也越来越显著。

与近似方法一样, 数值方法也可以分为两类: 第一类方法基于 Maxwell 偏微分方程, 如时域有限差分法和有限元法; 第二类基于积分方程, 例如矩量法和边界元法等。在电磁场的数值方法中, 最早出现并获得广泛应用的是 Harrington 提出的矩量法和 Yee 提出的时域有限差分法。后来, 在结构力学里已被证明十分有效的有限元法也在电磁领域获得大量的应用。在数值方法的初级阶段, 受计算机条件的限制, 早期的研究属于方法性的研究, 主要处理简单形状的物体, 传统的数值方法本身其效率也很低。以矩量法为例, 如果所研究的问题涉及 N 个未知数, 则传统矩量法所需要的计算机内存为 $O(N^2)$, 在以后的 20 世纪 70 年代和 80 年代, 矩量法也取得了很大发展。由于能够有效地利用计算机内存及容易编程, 时域有限差分法及有限元法在工程中获得了更广泛的应用。

1) 微分方程类数值方法。一般说来, 数值方法将 Maxwell 方程或相关的积分方程转化成一个矩阵方程。对于微分方程类数值方法, 由于偏微分方程揭示了场的局域相关性。因此, 所生成的矩阵为一稀疏矩阵。在时域有限差分法中, 其等效矩阵与向量相乘更可以写成非常简单的计算机程序。所以, 实际的时域有限差分法程序并不涉及矩阵的存储, 这一特性使得时域有限差分法非常实用。在 Taflov 等人的努力下, FDTD 在电磁分析与计算中获得了广泛的应用。然而, 在微分方程类数值方法中, 其未知数在理论上应定义在整个自由空间以满足电磁场在无限远处的辐射条件。由于计

算机只有有限的存储量, 人们引入了吸收边界条件来等效无限远处的辐射条件, 从而使未知数定义在有限的空间内。最著名的吸收边界条件如 Berenger 提出的理想匹配层 (PML) 等。因此, 微分方程类方法所涉及的未知数数目是很多的。另外, 由于偏微分方程的局域性, 使得场在数值网格的传播过程中形成耗散误差, 所研究的区域越大, 耗散误差的积累越大。所以, 为保证计算结果的精确性, 对于大尺寸目标, 人们不得不采用更精细的网格来剖分。数目庞大的未知数和数值耗散问题使得微分方程类方法在分析特大电磁目标时遇到了困难。

2) 积分方程类数值方法。与微分方程类方法相反, 积分方程类数值方法中的未知数仅定义在源上。以理想导体的散射为例, 其未知电流定义在理想导体的表面上, 而不是整个自由空间。因此, 积分方程类方法的未知数数目要比微分方程类方法少得多。另一方面, 由于格林函数的引入, 电磁场在无限远处的辐射条件已解析地包含在积分方程类方法之中。所以, 场在数值网格的传播过程可由格林函数精确地描述, 进而, 其数值耗散误差可以减至很小。然而, 由于积分方程的全局性, 积分方程类方法所产生的矩阵为一稠密矩阵。如果使用传统的数值方法, 无论是计算机存储还是计算速度, 其效率都很低, 为 $O(N^2)$ 。

3) 快速算法。为了解决积分方程类方法稠密矩阵计算带来的计算机存储和计算速度问题, 建立快速算法。一般说来, 快速算法可分为两类: 一类基于快速傅里叶变换 (FFT), 一类基于快速多极子方法 (FMM)。基于快速傅里叶变换的共轭梯度法 (CG-FFT) 是有效求解积分方程的算法之一, 其所需要的计算机存储量仅为 $O(N)$ 。矩阵与向量相乘的复杂度仅为 $O(N \lg N)$, 但是 CG-FFT 要求其未知数密集地排列在某一平面或某一体积内, 以便于应用数值卷积定理。因此, 它主要应用于求解体积分方程 (例如非均匀介质体) 和平面积分方程 (如理想导体平板)。相反, FMM 具有很高的灵活性, 它可以处理任意的曲面积分方程, 因此获得了广泛的应用。到目前为止, 已应用 MLFMA 成功地解决了具有一千多万未知数的超大型电磁问题。

总之, 微分方程类和积分方程类数值方法各有千秋。微分方程类方法的优点是算法简单, 易于计算机实现且所涉及的矩阵为一稀疏矩阵, 易于计算机存储。但通常这类方法的未知数数目很多, 并受到数值耗散问题的困扰。相反, 积分方程类方法的未知数数目较少, 数值网格的灵活性强且数值耗散误差很小, 但是这类方法生成一稠密矩阵, 使计算机存储量及计算复杂度增加。随着快速算法的出现, 上述问题得到解决, 从而积分方程类方法可以解决超大型的电磁问题。

此外, 计算电磁学还包括其他很多方法, 例如频域有限差分法 (FDFD)、传输线法 (TLM)、谱域法、直线法、测量不变性方程法 (MEI) 及小波法等。

(4) 数值计算方法的选择。在选择商用软件包进行电磁兼容仿真时, 需要考虑电磁兼容建模的类型、可用的计算机资源及软件价格等方面的内容。许多商用的软件包可以用来模拟各种有源器件和小型电器设备的电磁兼容问题, 但目前尚未开发出一种可解决任何电磁兼容问题的超级软件包, 还须用不同的软件包来解决不同的电磁兼容问题。另外, 许多科研和工程部门开发了自己的计算程序, 以便对感兴趣的电磁兼容问题进行更具体、更精确的仿真。商用软件包大体上可以分为以下四类。

1) 基于矩量法的软件包。这些软件包可以对 2.5 维的

平面结构（限于无限大接地面和无限大的横向尺寸）和部分三维高频结构与天线特性进行仿真，但有些基于电磁场数值计算程序的软件包不能对介质材料进行建模，所有这些软件包都可以仿真辐射天线的阻抗、频率和远场辐射。这些软件包每次仿真只能获得一个频率点的结果，在电磁兼容仿真时需要扫频分析技术。

2) 基于频域有限元法计算与分析电磁兼容问题中的高频结构与天线特性的软件包。虽然这些软件包并不是针对电磁兼容问题和天线分析而设计的，但是它们可以对所有的三维结构进行建模，包括平面天线结构。这些软件都可以计算天线的远场方向图、天线输入阻抗、频率特性和一些三维的计算结果显示。与矩量法程序一样，这些软件包每次仿真也只能获得一个频率点的结果，要获得扫频结果，需要进行多次的计算。一般来说，对于需要精确建模的电磁兼容结构，基于有限元法的程序比利用矩量法的程序计算耗时更长，需要更多的计算机资源。

3) 利用时域有限差分法计算与分析电磁兼容问题中的高频结构与天线特性。这些软件包可以对有耗介质、磁性材料、有限的接地面、三维的理想或者非理想导体等构成的高频结构与天线系统进行建模。这类软件包多数支持稳态和瞬态场的二维、三维显示。由于电磁兼容仿真在时域进行，一次计算就可以获得宽频带的阻抗和辐射特性。有些软件包可以对于局部结构进行细分，以便缩短仿真时间。仿真时间取决于计算空间内的单元网格数目，而单元网格数目与所需数据对应的最大频率以及天线系统中的材料特性有关。

4) 基于其他数值计算方法的软件包。这些软件包采用了 FIM（有限积分法）、Mom/UTD/FD（矩量法和一致绕射理论和有限差分法的混合）、Mom/PO/UTD（矩量法、光学物理法和一致绕射理论的混合），这些软件包吸收了不同方法的优点，对于几何结构较大且内部结构又很复杂的电磁兼容问题比较适合。另外还有基于 BEM（边界元法）和 TLM（传输线法）等方法开发的软件包。较著名的软件名称和性能见表 9.1-18。

表 9.1-18 较著名的软件名称和性能

软件名称	基本方法	特 点
NEC2、NEC-Win	矩量法	适合于线结构
Ensemble	矩量法	计算辐射天线的远场方向图、天线输入阻抗、频率特性和一些三维结构的计算结果显示
IE3D	矩量法	辐射天线的远场方向图、天线输入阻抗、频率特性和一些三维结构的结果显示
EMC2000	矩量法和物理光学法结合	适合于大体积的三维结构，如飞机、船舰，算出面电流，接着计算近场和远场，三维图形显示
HFSS	频域有限元法	计算辐射天线的远场方向图、天线输入、频率特性和一些三维结构及计算结果
ANSYS-HFEM	频域有限元法	计算高频问题中的辐射天线远场方向图、天线输入阻抗和频率特性，电磁场对于生物的影响（SAR）
FEMLab	MATLAB 和 FEM	适合于高频和低频三维结构

续表

软件名称	基本方法	特 点
XFDTD	时域有限差分法	适合于有耗介质、磁性材料、有限大接地面、三维的理想或者非理想导体等构成的高频结构与天线系统
Fidelity	时域有限差分法	适合于有耗介质、磁性材料、有限大接地面、三维的理想或者非理想导体等高频结构与天线系统。软件包支持电磁场和瞬间场的二维、三维显示
FEKO	矩量法、光学物理法和一致绕射理论的混合法，是矩量法的时域分析	用线性组合的基函数可算出其表面电流，接着算出各种参数，如近场、远场、雷达散射界面、略微的方向性和辐射体的输入阻抗
OERSTED	边界元法	二维空间上多导体之间的耦合问题和感应电流或涡流
FARADAY	边界元法	三维空间上多导体之间的耦合问题和电流或涡流问题
SINGULA	边界元法	三维空间上导体的电磁辐射问题
CST	频域有限积分法	对所有的三维结构进行建模，包括平结构。这些软件包都可以计算天线的远图、天线输入阻抗、频率特性和一些计算结果显示
Micro-Strips	传输线矩阵法（在时域计算）	适合于有耗介质、磁性材料、有限大接地面、三维的理想或者非理想导体等高频结构与天线系统，软件支持电磁场和瞬间场的显示

4 电磁环境效应管理

4.1 电磁环境效应管理要点

电磁环境效应是一门综合性的工程基础技术，它源于电磁干扰和电磁兼容技术的发展，几乎涉及所有电磁学科。电磁环境效应是一门高技术的学科，为了在最短的时间内，以最小的开发成本，把新设备成功地应用到舰队中去，应对和解决电磁环境效应对军队、设备、系统和作战平台作战能力的影响问题，必须遵循电磁环境效应的要求和管理。

(1) 确定装备使用的主要地理位置。规定装备项目研制早期可能工作的电磁环境进行定义。电磁环境首先是明确系统使用的主要地理区域。

(2) 确定装备属主平台。必须明确装备预期安装的主平台和系统或者与该装备相关联的平台和系统。

(3) 频谱依赖装备。明确可能与装备有相互影响的任何现有和计划的频谱依赖项目的类型和特性。

(4) 任务和使命。确定战场和任务条件下的电磁环境。

(5) 全寿命期的电磁环境。尽管项目早期就确定了电磁环境，但由于环境并不是静态的，因此在整个的寿命周期中，需要对电磁环境进行不断更新。每个项目在其寿命周期都可能会暴露于几个不同的电磁环境电平。

(6) 与生存性相关的电磁环境。GJB 1389A—2005《系统电磁兼容性要求》中提供了电磁环境的一般信息，用来在确定装备可能暴露的电磁环境的功率电平，但应针对特定的

应用情况进行剪裁。

(7) 敏感性相关。装备的敏感性特性依赖其设计特性。例如，项目可能是宽频带响应的或者是频率选择的。也可能某些设备只有微秒级的响应时间，受到短期信号峰值功率电平的影响；反之，还有的设备受到加热的影响，而对信号平均功率电平产生响应。

(8) 未来的考虑。当定义装备可能遇到的电磁环境时，也应考虑项目在预期使用电磁环境和将来应用的可能变化。

如设计的项目最终都会在联合作战中使用。

4.2 频率分配

4.2.1 电磁频谱的划分

电磁频谱的无线电频段（也称射频）是人类使用最频繁的部分。为了便于使用和称呼，把无线电频谱划分成若干频段，我国现行的无线电频段和波段名称及频率范围见表9.1-19。

表 9.1-19 我国现行的无线电频段和波段名称及频率范围

段号	频段名称	频率范围	波段名称	波长范围 (含下限，不含上限)
1	极低频	3~30Hz	极长波	100~10Mm
2	超低频	>30~300Hz	超长波	10~1Mm
3	特低频	>300~3000Hz	特长波	1000~100km
4	甚低频 (VLF)	>3~30kHz	甚长波	100~10km
5	低频 (LF)	>30~300kHz	长波	10~1km
6	中频 (MF)	>300~3000kHz	中波	1000~100m
7	高频 (HF)	>3~30MHz	短波	100~10m
8	甚高频 (VHF)	>30~300MHz	米波	10~1m
9	特高频 (UHF)	>300~3000MHz	分类波	10~1dm
10	超高频 (SHF)	>3~30GHz	厘米波	10~1cm
11	极高频 (EHF)	>30~300GHz	毫米波	10~1mm
12	至高频	>300~3000GHz	丝米波	1~0.1mm

4.2.2 频谱管理

(1) 频率分配。为一个或多个无线通信服务，如固定、陆基移动、空对地或商业广播使用的指定频率带宽。

表 9.1-20 是最新频率分配表。从这个表上可以清楚地

看到 3MHz~3000GHz 各频段的主要用途。装备应该在系统的概念研究、虚拟样机、确认阶段尽可能早地从军事通信、电子通信、雷达、导航或其他使用电磁频谱的系统获得电子通信系统的无线电频率频谱指导。

表 9.1-20 频率分配表

名称	甚低频	低频	中频	高频	甚高频	超高频	特高频	极高频
符号	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
频率	3~30kHz	>30~300kHz	>0.3~3MHz	>3~30MHz	>30~300MHz	>0.3~3GHz	>3~30GHz	>30~300GHz
波段	超长波	长波	中波	短波	米波	分米波	厘米波	毫米波
波长	100~10km	10~1km	1km~100m	100~10m	10~1m	1~0.1m	10~1cm	10~1mm
传播特性	空间波为主	地波为主	地波与天线	天线与地波	空间波	空间波	空间波	空间波
主要用途	海岸潜艇通信、远距离通信、超远距离导航	越洋通信、中距离通信、地下岩层通信、远距离导航	船用通信、业余无线电通信、移动通信、中距离导航	远距离短波通信、国际定点通信	电离层散射 (30~60MHz)、流余迹通信、人造电离层通信 (30~144MHz)、对空间飞行体通信、移动通信	小容量微波中继通信 (352~420MHz)、对波层散射通信 (700MHz~1GHz)、中容量微波通信 (1.7~2.4GHz)	大容量微波中继通信 (3.6~4.2GHz)、大容量微波中继通信 (5.85~8.5GHz)、数字通信、卫星通信、国际海事卫星通信 (1.5~1.6GHz)	在入大气层时的通信、波导通信

(2) 频率指配。授权频率相关系统在规定的条件和约束下，使用某一频率。

(3) 设备频谱认证。是国家权威机构对某一频谱相关设备或系统的技术特性与国家频谱管理政策、分配、规章和技术标准符合性进行评审后，对其符合相关要求的充分性声明。设备频谱认证也称作“频谱认证”。

(4) 频谱保障性。是维持军用系统在作战电磁环境中有效互操作所需频率和带宽的保证。

4.2.3 设备频谱认证过程

如果设备没有按照任务空间情形形成的极端密集、大功率电磁环境进行设计或试验，产生电磁干扰的可能性会增加。没有经过认证的发射机和接收机，都会对频谱规划产生风险。

(1) 申请信息。按照评估要求对设备功能模块的详细说明。

1) 设备名称、用途、系统组成和频率要求等。

2) 发射机设备特性所有的技术参数,如调谐范围、输出功率、射频通道容量和发射带宽等等。

3) 接收装置特性参数及接收机能经受住严酷的军用电磁环境。

4) 天线性能参数如方向性、极化方式、波束宽度、增益等。

5) 提供装置示意图的线路图。

(2) 频带选择。在预定无线电服务,如通信、导航、无线电定位和设备运行的现行频率分配检查;应该在可能对可能受到的干扰影响进行调查的基础上评估,以确定某种技术因素是否可能导致非常合适的特定频带选择。

(3) 设备频谱认证程序。采用频谱认证数据维护和检索软件系统,通过组织和编译标准格式所需的信息来使一部分频谱认证程序自动化完成。

4.2.4 频率指配

对无线电设备指定具体使用频率的过程称频率指配,是实行频率管理的最终体现。通常,所谓“频率分配”或“频率划分”是指给出一个使用频率范围或一组使用频率,并非实时使用的具体频率。

4.2.4.1 频率指配原则

进行频率指配时必须遵循的下列原则:

1) 所指配的频率必须符合国际和国家的有关规定,即国际电联和我国颁发的有关文件,在规定的频段、规定的业务范围内指配频率。

2) 所指配频率不得对本频段内其他台站造成有害干扰,如属次要业务,不得对本频段的主要业务产生有害干扰。为此,在指配频率之前必须向有关无线电管理部门了解该频段已有设备或系统的频率占用情况,提出频率申请。

3) 注意避开有关保护频率(如标准时间信号频率,遇险、呼救频率等)以及常规无线电广播、电视等频率及其谐波的影响。

4) 为在使用区域内避免同频干扰、邻道干扰、中频干扰、镜像干扰以及互调干扰,所指配的频率必须进行干扰分析预测,并根据业务性质、通信质量要求等确定干扰裕量及保护比。

5) 频率指配时不仅要考虑工作频率,还必须考虑到发射功率、谐波与杂波电平、占有带宽、定向发射时天线方向图特性等因素。

4.2.4.2 频率指配工具及指配过程

如图 9.1-53 所示,EMC 电磁干扰分析预测是进行频谱指配的主要技术手段,其主要目的是解决系统间或系统天线

间的辐射耦合干扰。分析预测以建立数学模型(干扰源模型、传输耦合模型、接收器模型)和干扰预测软件为主要工具,并辅之以完成分析预测所必需的数据库。

数据库系统是频率管理、频率指配的重要工具。该数据库应包括电磁环境数据(由频率监测设备获得并实时更新)、系统或网络数据、地形数据、设备参数数据、技术标准数据、行政管理数据、位置及坐标转换数据和频率占用数据(保护频率、已指配的频率)等。

4.2.4.3 频率工程系统

为了在复杂的电磁环境中实施有效的频率管理,其软件功能包括下列几部分。

(1) 战术系统 II 号 (FACTS-II) 的频率分配能力。完成多信道无线电网络的频率分配。已经设计的程序可以实现波段 I、III 和 N (对流层散射),微波以及专用电台的兼容性频率指配。输入信息包括频率资源、电台位置和通信网的结构。另外,用户可以预先指定频率、天线极化、天线高度等信息。频率指配可以满足以下要求:

- 1) 共场地设置若干电台时,发射机到发射机的间隔。
- 2) 共场地设置若干电台时,接收机到接收机的间隔。
- 3) 单个电台收发信机的间隔。
- 4) 共场地设置若干电台时,发射机与接收机的间隔。
- 5) 像频限制。
- 6) 互调限制。
- 7) 杂散(寄生)频率限制。
- 8) 场地间的发射机与接收机的间隔。

(2) 地形资源分析程序。使用两地间的地形剖面图,确定两电台间的传播损耗。地形剖面图可以从含有数字地图的数据库中获得或从人工测绘的地图中提取并用于该程序。提取并求出剖面图的几何参数同时选择适当的传播模型,计算路径损耗。

(3) 线路规定和态势系统。本程序可使在一个多信道网络上进行频率规划和维持态势信息所需的条款实现自动化,包括线路规划和对通过网络的某个线路指定具体的路由,并在展开以后保持系统网络和线路变更后的路由轨迹、多信道系统网络、多信道编号系统、系统的安全性以及网络终端的位置。使用系统维持选择输入信息,包括线路数目、优先权、电话用户、安全性和预置信道数、输入系统和线路的数据后,用户可以获得多信道系统图形和线路指定图表的打印结果。

(4) 视线有效范围模型。该程序可利用地形图数据库产生无线电有效视距范围覆盖图。对选定的天线场地,可以画出等信号强度线,完成场地上几个天线的高度计算以帮助选择天线、有效范围半径、有效范围的扇形区域、地图比例尺以及背景遮蔽。

(5) 通信—电子设备操作指令。在模拟了广泛用于国家安全部门的系统之后,该系统根据频率再用和共址方案,可以对某个网络结构中的每一个网随机地分配频率,在频率再用方案之下,战斗无线电网被分成若干线和若干地域。在每一级中有几个地域,在同一级中频率可以再用,但不能在级间复用。在一个地域中,指配的频率只能被使用一次。共址分析程序实行兼容性检查以减少所设置电台之间的干扰数目。

(6) 短波预测模型。为短波通信的两种可能方式预估工作频率、功率和距离、天波和地波。天波方式可预估最高可用频率、最佳传输频率和最低可用频率,当利用电离层反射方式进行通信时,这种预测方法是非常优越的。地波方式可

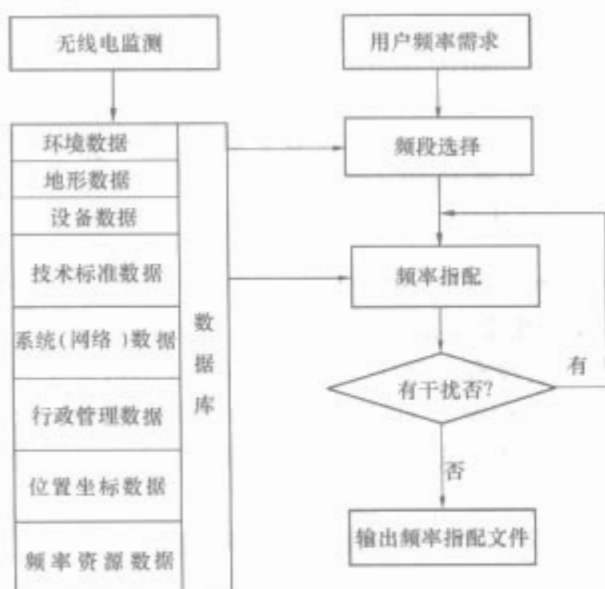


图 9.1-53 频率指配工具及指配过程

以预测需要的发射机功率和通信距离,当通过地表波进行通信时,这种方法可以达到目的。

(7) 预测评价系统 (APES)。利用各种传输模型的组合,预测以下内容:

1) 一个高频 (HF) 发射在两个给定点之间传输的可能性。

2) 根据地球物理学分析信号传播有效距离。

3) 世界上任意两点间可用的频段。

(8) 电磁干扰分析。鉴别影响场地上每一台 FM 接收机无线电干扰的可能原因,所考虑的干扰机理有:邻近信号、寄生响应、寄生发射、发射机互调和接收机互调。

(9) 通信电子战评价系统 (COM/EW)。全球地形装载器、战场电子设备数据库、共址分析、雷达频率工程系统、发射体选址分析系统、频率冲突避免功能、非共址信号—干扰比能力 (OFF-S/D) 等。

4.3 电磁环境效应和频谱验证试验与评估

产品从开始立项到完成生产各个阶段的过程,有五个关键需求文件提出电磁环境效应要求。这些文件是:任务需求说明、适用性要求文件、性能规范、工作说明、测试与评估计划。下面主要论述测试与评估。

4.3.1 试验与评估计划

目标是保证电磁环境效应和频谱验证评估在研发期间进行,在运行期间各阶段执行并且评估完成电磁环境效应和频谱验证。性能和操作限制及易损性期间测试与评估计划确定剪裁程序说明关键性能参数鉴定的技术参数和评价的操作条款满足要求,并且平台/系统或分系统/设备在其预期的电磁环境中证明有效的性能。

(1) 关键性能参数。关键性能参数是成功完成任务必须考虑的系统能力或特性,不满足关键性能参数门限将导致系统选择再评估或程序再评估或终止。典型的关键性能参数对于给定的系统最大限定数为 8。

(2) 评价的操作条款。包括技术特点、性能测量和以操作效能、适用性、互用性为基础的条款。

1) 平台/系统 (或分系统/设备) 探测战场环境中的危害等级允许成功的使命范围足够,注明战场电磁环境。

2) 系统在战场环境中工作安全性,强调电磁辐射对人员、燃油和军械的危害。

3) 平台/系统 (或分系统/设备) 能完成其危急使命。需确认是否该项在电磁环境中而不会引起或受其他项的影响功能下降。

4) 平台/系统 (或分系统/设备) 准备好联合以及组合操作。该项必须评估设计的联合或组合的电磁环境。

4.3.2 装备电磁环境效应试验阶段

项目研制生产的全寿命周期,需要信息来进行风险评估、确定与性能规范的符合性和确定项目在其预期使用中的有效性、适应性和生存性。必须制定计划,并在项目寿命周期内实施所有适用的验证,对每个阶段和相应的性能进行评估。

1) 第 1 阶段。通常在工厂、实验室或开阔试验场地进行的分系统/设备鉴定试验。

2) 第 2 阶段。分系统/设备安装检查 (目视检查),其目的是确定项目安装是否正确 (接地、搭接、缆线分隔等)。

3) 第 3 阶段。功能试验,其目的是确定安装后的分系统/设备是否满足其性能规范。

4) 第 4 阶段。分系统内试验,其目的是表明构成功能

分系统的设备 (如雷达、点火控制、机械控制、通信等) 在一起能够令人满意地运行。这个试验也要表明分系统本身不会产生电磁环境效应或没有内部的电磁干扰。

5) 第 5 阶段。分系统/设备间 (或平台/系统内) 试验和分析,其目的是验证在平台或系统上的项目功能正常,从而平台/系统能执行其任务。该工作也将确认平台/系统内所有的分系统和设备都能有效运作,而没有由于电磁干扰降低彼此的性能。

6) 第 6 阶段。整个平台或系统的试验和分析,其目的是确认所有分系统和设备在一个能够代表作战空间场中都能满意地展示出其作战性能,所有的项目都能运行。这些使用试验或分析评估可能在雷达、通信分系统、武器分系统、军械等之间产生的平台/系统内和平台/系统间的相互作用。试验不是一对一的相互作用,而是在该电磁环境中所有感应器和辐射器 (不论是平台或系统本身的,还是邻近的其他平台/系统的) 一起工作的全面使用试验。

4.3.3 研制试验与评价

研制试验与评价的目的是验证工程设计和研制过程的完整性,将电磁环境效应风险降至最小,项目符合其根据剪裁的军用标准 (如 GJB151A—1997 或 GJB1389A—2005) 或商业标准形成的合同电磁环境效应规范。研制试验通常由工厂、实验室或开阔试验场的研制者计划并实施,这些试验包括项目已经获准进入全面生产后的生产验收试验与评价和首件电磁环境效应试验,成功的研制试验工作最后一步就是证明项目已经做好了使用试验与评价的准备。

4.3.3.1 分系统和设备

分系统和设备的试验必须符合 GJB151A—1997 规定的电磁干扰要求,即,传导和辐射的发射和敏感度 (抗扰度) 要求。这些要求的确认也要由基于 GJB152A—1997 的试验进行验证。分系统和设备符合电磁干扰要求并不意味着整个平台或系统兼容状态良好。必须对民用产品进行充分的试验,以确保其针对军事应用的性能、使用效能和使用适应性。

4.3.3.2 平台和系统

平台和系统的试验策略:航空、航海、空间和地面平台和系统 (包括相关军械) 的研制必须符合 GJB1389A—2005 规定的电磁环境效应要求。经剪裁的电磁环境效应要求的验证由试验、分析、检查或其中某些组合完成,主要取决于根据特定方法的置信程度、技术适用性、有关费用和可以得到的资源。

(1) 平台/系统内的电磁干扰试验。GJB151A 规定的分系统和设备的限制是由大多数技术状态和环境的经验推导得到的,已经有成功地记录证明这些限制可以在平台/系统级缩小问题的影响范围。符合电磁干扰要求可以保证以高的置信度实现平台/系统兼容性;然而,并不能完全保证实现兼容性。不符合电磁干扰要求常常导致使用问题,越不符合,出现问题的可能性就越大。坚持这些要求将得到较高的置信度,即平台或系统及其相关分系统和设备集成后能够兼容地运行。

(2) 平台/系统间的电磁干扰评价。一个平台或系统的电磁能量对另一平台或系统产生不利影响而导致的使用问题。平台和系统及其相关分系统和设备运行所处的电磁环境由多种来源形成。可以用其单个特性,如功率等级、调制、频率、带宽、天线增益 (主波束、旁波瓣和后波瓣)、天线扫描等说明每个发射机的影响。这些特性在确定对性能的潜在影响时非常重要。

(3) 电磁易损性。某些平台/系统间的电磁干扰试验可以在实验室条件下进行,在这种情况下受试项目和模拟的电磁环境都处于受控状态。可能需要对在常规电磁干扰试验期间监测到的非期望响应进行电磁易损性分析,以便确定实验室观测到的敏感性对使用性能的影响。由于对各种条件的控制很少,通常只能演示少量的功能而且费用很高,因此,很少在真实的电磁环境中进行使用试验。电磁易损性分析和试验的结果提出了进行改型、增加分析或试验的可能需求。对平台/系统间环境进行评价,以从部署后可能遇到的发射机、最佳耦合频率、分系统和设备的敏感性、可用的模拟器以及可能发射的,经授权的试验频率等角度确定哪些频率是重要的。该环境评价要求对项目周期内项目可能遇到的敌我双方电磁环境进行描述。在这些考虑和其他独特因素的基础上,导出试验发射机的有限清单。对于每台试验发射机,都要对项目进行照射并对敏感性进行评价。

4.3.3.3 特殊电磁环境效应要求的确认

特殊的电磁环境效应要求的确认包括对沉积静电、雷电、电磁脉冲、电磁辐射危害进行说明,这些要求应根据具体情况,按照任务书、测试大纲或合同文件的说明使用。

(1) 沉积静电。在飞机及其相应分系统/设备的设计和建造期间,要对静电荷聚积进行控制,必须验证飞机当遇到静电时不会引发危险。必须对涂料电阻进行确认,确认其在要求的范围之内,以避免电荷的过度聚积。此外,应对金属和复合结构进行检查,以确认其充分连接并且使用了具有电传导性的硬件和表面。

(2) 雷电。雷电要求的确认是验证能够在雷电威胁环境中保护平台或系统所必需的。在研制期间,通常要通过大量的试验和分析挑选出最佳设计。这些评价可以看作是验证过程的一部分,必须正确地进行记录。例如,飞机的飞行试验可以在进行雷电防护控制确认之前进行。在这种情况下,飞行试验大纲应该包括禁止在离雷暴风雨一定距离的范围内飞行的限制。

(3) 电磁脉冲。对于具有核电磁脉冲要求的项目,需要进行确认,以验证采取的控制手段提供了充分的防护,验证平台或系统满足 GJB1389A—2005 的电磁脉冲要求。可以通过验证任务关键分系统或设备分系统或设备接口瞬态电平不超过 GJB151A—1997 或其他经剪裁的加固等级以及已经满足了要求的设计裕度来完成这种确认。通常要求分析和试验组合进行,以便确认经受电磁脉冲后的性能。需要进行分析 and 建模,以便确定可能耦合进平台或系统的电磁脉冲场没有引起损坏。可以使用相似平台或系统的已有耦合数据来评估由电磁脉冲产生在每个任务关键分系统或设备接口上的电压和电流。

(4) 电磁辐射危害。

1) 电磁辐射对人员的危害。应进行 HERP 评价,以确定人与射频发射机的安全距离。可以在射频发射机特性的基础上计算确定安全距离,也可以通过测量确定安全距离。一旦确定了一个距离,就要对人员进入区域与天线特性一起进行检查。如果人员已接近危险区域,就必须采取适当的措施,如作警告信号和在服务出版物、指南手册、操作手册等文件,并给出预防措施。

2) 电磁辐射对燃油的危害。通过对实际功率密度与已建立的安全标准进行比较来确定燃料危害的存在和范围。特定燃料的挥发性和燃点将影响在变化的电磁环境条件中是否存在危险。电流的量值以及由此产生的在两个导体间隙的火花强度,取决于场的能量密度以及导体作为接收天线的特

性。通常通过检查和分析,以及限于特殊环境的试验进行确认。燃料危险准则基于峰值功率,平台或系统上任何可能出现燃料蒸气的区域都需要进行评价。可能需要对某些发射机的使用作出限制,以便确保在某些使用状态(如加油等)的安全。

3) 电磁辐射对军械的危害。将军械暴露于寿命周期所有状态,包括包装、装卸、储存、运输、检查、加载、卸载以及从主平台/系统发射的各种试验电磁环境,以确定其敏感度特性。确认方法必须表明军械装置将不会无意运行、点火或哑火。用于确定敏感性特性的方法要求用任何可能的技术在该装置上安装仪器,这些技术包括热电偶和光纤温度传感器、射频电压或电流探测器、温度敏感器或更敏感的其他元件。这类仪器必须不改变军械的总体灵敏度或响应特性。试验电磁环境要求能够从频率、场强或功率密度、场极化和入射角等方面尽可能模拟使用电磁环境。对于雷达电磁环境,应选择具有代表性的脉冲宽度、脉冲重复频率和波束驻留期,以使军械响应最大。在高频范围,发射天线应与在使用中产生电磁场的天线类型相同。确定共振频率是电磁辐射对军械的危害试验的基本方面。

4.3.4 使用试验与评价

在研发测试评估完成后,应进行电磁环境效应、频谱保障性使用评价以确定项目是否能有效地运行并与预期的用途相适应,验证使用性能符合在测试和评估大纲中规定的关键性能参数。使用试验和评价应尽可能在真实的使用电磁环境中完成。

(1) 原则要求。

1) 用作验证的项目应是生产技术状态,优先采用首付产品。

2) 项目应反映所有获准工程更改建议和修改的最新状态(包括硬件和软件)。

3) 根据需要针对 GJB151A—1997 或 GJB1389A—2005 的电磁干扰合格鉴定试验,应在使用试验之前进行,以提供一个性能基线并指出在使用试验期间可能需要特别注意的区域。

4) 所有项目应处于工作状态,并且放在能够使干扰或敏感性指示最大的平台特定方位和角度,符合整体使用性能要求。

5) 用于使项目工作的任何外部电力应符合平台或系统的电力质量标准。

6) 应对发现的任何异常进行评价,以确定其是真的电磁环境效应问题还是某些其他类型的故障或响应。

7) 提出的任何修改工作完成后,应对具有有效性进行确认。

8) 任何适用的裕度都需要进行验证。

(2) 平台/系统内电磁干扰试验。针对电磁干扰控制要求,研制试验是一种降低风险的措施。保证平台或系统及其相关分系统和设备能够在使用电磁环境中兼容运行。平台/系统电磁干扰使用试验期间应考虑下列问题:

1) 应该成对标识潜在的电磁干扰源和受害者,并且通过各种不同模式和功能对安装在平台或系统上的分系统和设备进行系统性评价,同时,监测其余项目的降级情况。一个干扰源对一个受害者和多个源对一个受害者的情况都应进行评价。

2) 应编制天线连接发射机和接收机的频率选择计划。

3) 发射机和接收机之间可预测的交感作用,如这些发射机和接收机的基本频率、谐波、互调产品、其他的伪响应

和交互调制。

4) 在其整个工作频率范围,包括紧急状况频率、对发射机和接收机的评价和有关分系统和设备,包括军械的电磁干扰问题评价。

5) 应对分系统和设备,包括军械的裕度进行验证。

6) 在实验室环境中发现的不期望响应使用评价。

7) 应在环境或背景电磁环境不会影响试验结果有效性的区域进行试验。一个密集的环境可能妨碍对平台或系统安装的其他分系统或设备发射有关的天线连接的接收机性能评价。

8) 试验应包括所有相关的外部硬件,如武器、储存、供应项目(即,那些由用户提供安装在平台/系统中的项目)和保障设备。

9) 确认任何的外部电源符合相应的电源质量标准。

10) 所有分系统和设备应能够在使用平台电源情况下同时工作。输电线失真、谐波或瞬态不应降低使用该电源的分系统和设备的运行。

(3) 互调干扰。用于现代舰船的大量高频发射机,其高输出功率和构造技术与材料使得互调干扰成为一种现实。对于水面舰船,高频发射在船体中产生了电流。来自不同发射机的不同电流以非线性方式在船体内混合,由入射信号的基本频率和谐波频率的累加和相减产生了调制信号。为有效地对频谱进行管理,要求进行试验和分析,应对第19级及其以上的互调干扰进行分析。应采取特定的控制措施以对舰船的内部电磁场进行限制,以保证各种舰载装船设备,能够在很少或不降低性能的基础上发挥功能。需要在分系统和设备运行的正常状态下进行试验,以对甲板下的电场进行检测并确认其符合相应的内部电磁环境要求。

(4) 电磁辐射危害和电磁环境普查。对海军货运船舶实施的工作,其目的是防止军械受到由高功率舰载发射机产生电磁环境的影响,这些工作包括产生一份船舶专用电磁辐射危害发射控制说明。应进行一次调查,以便明确整艘舰船的发射机、接收机和军械装卸和加载区域。在确定军械敏感性特性之后,应确定舰船使用的最坏电磁环境,以确保在军械

储存、装卸和使用的地方不会出现具有潜在危害的电磁环境电平。应在所有的军械位置对可能产生具有潜在危害的电磁环境发射机发射进行测量,使发射机处于工作状态以尽可能地模拟最坏的使用电磁环境,然后对测量数据进行分析并用于确定电磁辐射危害发射控制程序。应编制一份评估报告并形成一份受试舰船专用的电磁辐射危害发射控制清单。

(5) 平台/系统间电磁环境效应评价。平台和系统测试与评估要求是以GJB1389A—2005为基础的。此外,为了确认所有可能遇到的电磁环境电平中的性能,可能需要进行一个全面的使用分析,下面给出了使用平台/系统间电磁环境效应评价,包含试验和分析时应考虑的问题的指南。

(1) 应该成对明确潜在的电磁干扰源和受害者,包括来自友方、敌方(如果已知的),联合和组合部队等各方面,并且在每个平台和系统运行分系统和设备的各种模式和功能来进行系统性的评价,同时,监测其余项目的降级情况。一个源对一个受害者和多个源对一个受害者的情形都应进行评价。

(2) 应对在预期的使用电磁环境平台和系统上的天线连接发射机和接收机制定一个频率选择或发射控制计划。

(3) 在基本频率和谐波上,发射机和接收机之间的可预测交感作用。

(4) 在其整个工作频率范围,包括紧急状况频率,对发射机和接收机的评价。

(5) 军械敏感性及其相关控制措施(频率、功率管理和空间分离)的评价。

(6) 应验证军械与其他分系统和设备电磁安全裕度进行验证。

(7) 应针对任务要求指出的响应进行使用评价。应在周围环境或背景电磁环境不会影响试验结果有效性的区域和时间进行试验,一个具有高密度频谱使用的环境可能会对评价工作产生妨碍。

(8) 试验应包括所有相关的外部硬件,如武器、库存、供应设备(即,用户提供的安装在平台或系统上的项目)和保障项目。



第2章 船舶电磁兼容性测量

1 概述

在电磁兼容领域中,实验与测试是解决工程电磁兼容问题和研究的重要手段,由于电磁兼容研究面对的电磁信号十分复杂,信号的频谱范围很宽(从几十赫兹到几十吉赫兹),既有时域又有频域信号;既有一般的电压、电流测量,又有复杂的电场、磁场测量。为保证测量的准确性和一致性,必须对其测量设施、测量仪器及其测量附件的特性等予以严格的规定。设备、系统按标准规定的内容进行考核,满足设备级电磁兼容性要求的基础上,有必要对整个系统进行电磁兼容性试验。

2 电磁兼容测量设施及仪器

2.1 电磁兼容主要测量设施

2.1.1 开阔试验场

开阔试验场的基本结构应是周围空旷、无反射物体、地面为平坦而导电率均匀的金属接地表面。场地按椭圆形设计(见图9.2-1),场地长度不小于椭圆焦点之间距离的2倍,宽度不小于椭圆焦点之间距离的1.73倍,具体尺寸的大小一般视测试频率下限的波长而定。如测试频率下限为30MHz,波长是10m,则选择椭圆焦点之间距离为10m。实际电磁辐射干扰测试时,待测设备(EUT)和接收天线分别置于椭圆场地的两个焦点位置。考虑到开阔试验场及屏蔽暗室的建造成本和环境限制,国内外电磁兼容标准将EUT到接收天线的距离定为3m和10m(俗称3m法和10m法)。如满足3m法测量,场地长度不小于6m距离,宽度不小于5.2m距离;如满足10m法测量,场地长度不小于20m距离,宽度不小于17.3m距离。

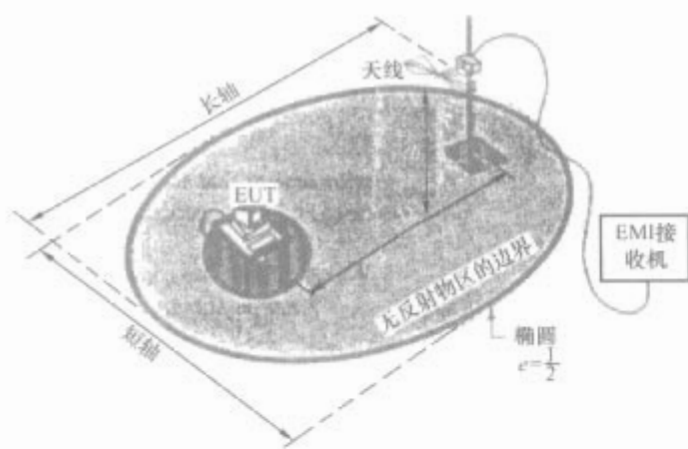


图 9.2-1 开阔试验场基本结构示意图

(1) 归一化场地衰减。场地衰减不仅与场地本身特性(材料、平坦性、结构、布置)及收、发天线的距离、高度有关,还与收、发天线本身的特性有关。将一对天线分别垂直和平行于地面放置,通过电缆分别与发射源和接收机连接,归一化场地衰减定义为

$$A_N = U_T - U_R - AF_T - AF_R \quad (9.2-1)$$

式中: U_T 为发射天线输入电压, dB μ V; U_R 为接收天线输出电压, dB μ V; AF_T 为发射天线系数, dB; AF_R 为接收天线

系数, dB; $U_T - U_R$ 称为开阔试验场的场地衰减, 而 A_N 称为归一化场地衰减。

(2) 开阔试验场的应用。开阔试验场在电磁兼容领域主要用于 30~1000MHz 频率范围对 EUT 进行电磁辐射骚扰测试, 并可适用于较大型 EUT 的测试。理想的开阔试验场可作为最终判定测量结果的标准测试场地, 其造价低于屏蔽半暗室。开阔试验场也可用于电磁辐射敏感度(抗扰度)的测量, 但不宜施加过大的场强, 以免对外造成电磁环境干扰。

在计量测试领域, 开阔试验场占有重要地位, 如天线系数的校准, 国际间的比对均要求在标准开阔试验场中进行。

2.1.2 屏蔽室

2.1.2.1 屏蔽室的用途

屏蔽室是实现电磁环境控制的重要手段, 其主要用途是:

(1) 防止外界电磁干扰, 保障室内低电平测试工作正常进行。

(2) 防止室内电子设备或系统散发的电磁辐射信号泄漏到室外形成干扰源, 对周围电子设备造成干扰。

(3) 防止室内信息技术设备的信息泄漏。

(4) 作为核脉冲加固, 防止室内电气和电子设备受核电脉冲和电磁脉冲破坏。

(5) 作为电波辐射防护, 保护室内工作人员免受高场强电磁辐射伤害。

屏蔽室的主要技术性能是: 屏蔽效能和屏蔽室的适用频率范围。

根据网络理论和电磁空间的对偶性, 屏蔽室可分为无源屏蔽和有源屏蔽两类。

2.1.2.2 无源屏蔽

无源屏蔽是指干扰源在室外, 屏蔽的目的是防止干扰波侵入到屏蔽室内部。

2.1.2.3 有源屏蔽

有源屏蔽是指干扰源在室内, 屏蔽的目的是使干扰波不传播到屏蔽室外部。

2.1.2.4 屏蔽室的谐振

屏蔽室是用导电体构成封闭六面体, 等效于一个大的矩形谐振腔。因此, 屏蔽室在一定激励条件下, 将按空腔谐振器的谐振规律产生谐振。

屏蔽室谐振是有害的, 不仅会降低屏蔽室的屏蔽效能, 而且还会在屏蔽室内产生驻波, 造成测试误差。对无源屏蔽, 这种影响还小些; 但对有源屏蔽, 则影响很大。因此应尽可能采取措施, 减小谐振现象的影响。

2.1.2.5 屏蔽室的反射

屏蔽室壁板(包括顶板和地板)的反射, 会给测试结果造成误差。例如, 在屏蔽室进行电磁辐射测试, 由于受试设备的机壳在各个面都可能存在泄漏并向外辐射电磁波, 因此测试天线除了接收来自设备受测面的直射波和经地面的反射波外, 还会接收到来自设备其他面从屏蔽壁板的反射波。这种反射波可以是一次反射, 也可以是多次反射, 从而给测试

引入误差。

为了减少屏蔽室反射对测试结果的影响,可采取以下措施:

(1) 增大屏蔽室尺寸,增加受测设备与屏蔽壁的距离,以减小屏蔽壁板的反射影响。

(2) 在给定的屏蔽室尺寸和测试位置情况下,经计算,对可能构成到达接收天线的一次和多次反射的部分屏蔽壁板(包括顶板)局部铺设吸收材料,以减少反射。

2.1.3 屏蔽半暗室

屏蔽半暗室也属电波暗室,是电波暗室的一种特定型式。表 9.2-1 为屏蔽半暗室与电波暗室的比较。

表 9.2-1 屏蔽半暗室与电波暗室比较

比较项目名称	屏蔽半暗室	电波暗室
屏蔽体	六面均有	六面均有
电波吸收材料	顶板和四周壁板有,地面没有	六面均有
对应空间	2π 空间	4π 空间
性能评价指标	场地衰减	静区

屏蔽室尺寸(长×宽×高)应为试验场地尺寸(长×宽×高)加上所采用的吸收材料长度 l (长和宽方向应加 $2l$,高度方向加 l)。采用半波偶极天线

$$L = \frac{\lambda_{\max}}{3} + d + B, W = \frac{\lambda_{\max}}{2} + 0.5, H = \frac{\lambda_{\max}}{4} + 4.25 \quad (9.2-2)$$

式中: L 、 W 、 H 分别为试验场地的长、宽、高, m ; λ_{\max} 为最低工作频率的波长, m ; d 为受测设备与测试天线距离, m ; B 为受测设备沿长度方向的最大尺寸, m 。

2.1.4 GTEM 横电磁波传输室

吉赫横电磁波(GTEM)传输装置是国外 20 世纪 80 年代末期间问世的标准电磁场装置。吉赫横电磁波传输装置综合了横电磁波传输装置、开阔场地测量、屏蔽室、微波暗室的优点,克服了各种方法的局限性,便于进行几乎全部辐射敏感度及发射试验。装置易于使用,并可用于精密测量。其反射和谐振最小,能最有效地使用空间,加工及维修成本费用最低。有极限的宽带特性,可用于进行时域、核电磁脉冲、雷电、其他脉冲波及连续波测量。其工作频率宽,模拟入射平面波,可以产生强的场强,而对周围的人员或设备没有危害或干扰。

目前,GTEM 装置除用于产生标准电磁场及作为场强计的校准场外,也用于进行电磁辐射敏感度试验和辐射发射试验。国际电工委员会(CISPR)和国家军标 GJB 152—1986 均推荐使用 TEM 装置进行 EMC 辐射敏感度测试。

2.1.5 混响室

2.1.5.1 混响室定义

混响室通常是装备机械调谐器/搅拌器以改变(搅拌)内部电磁场结构分布的屏蔽室。混响室内的试验描述为以机械调谐器/搅拌器“搅拌”屏蔽室内部谐振模式的随机过程,也称为搅拌模式室、模式搅拌室或模式调谐室。

一般来说,混响室是根据矩形金属谐振腔特性,利用其高 Q 值、多模态的性质,在一个较大的金属壳体内获得具有统计规律上的均匀场,并用该场来等效实际的环境来进行电磁兼容测试工作,如进行设备的辐射敏感度测量、屏蔽效能测量等。

混响室的优点:

1) 能很好地将混响室内外的电磁场进行隔离,不形成电磁环境污染。

2) 在大体积空间范围内获得高电平电磁场,而不需要太大的射频能量。

3) 在一定的试验周期内,在试验区内的每个位置都能产生比较一致的各向同性最大场强值,从而形成统计意义上的各向同性电磁场。

4) 在进行电磁兼容试验或其他试验时,不需要受试设备在空间旋转等。

2.1.5.2 混响室的主要特性

(1) 混响室的谐振频率。混响室的谐振频率与谐振腔的谐振频率基本相同,对于尺寸为 $a \times b \times l$ 的矩形谐振腔来说,其谐振频率为

$$F_{\text{map}} = 150 \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2} \quad (9.2-3)$$

式中: m 、 n 、 p 为整数且不能两个同时为 0,分别表示在该谐振频率下,谐振腔内部的场沿 a 、 b 、 l 方向分布的半驻波个数,每一组 m 、 n 、 p 对应着矩形谐振腔内电磁场的一个模; a 、 b 、 l 分别为矩形谐振腔的宽、长和高, m ; F_{map} 表示对应的谐振频率, MHz 。

(2) 混响室的最低使用频率。 F_{101} 为矩形谐振腔的最低谐振频率(对于一个 $10.8\text{m} \times 5.2\text{m} \times 3.9\text{m}$ 的混响室来说,其最低振荡频率为 32.0156MHz),其对应的振荡模为 TE_{101} 模,为最低振荡模或主模,该模的电场只有 b 向的分量,在腔体中央最强,磁场有 a 向和 l 向分量,在腔壁附近最强,腔中央为零。

低于混响室的最低谐振频率时,在混响室内无法振荡,不能储存能量;当用最低谐振频率激励时,在混响室内只能产生一种模态(主模)的场分布,分布很不均匀,不能满足使用要求。一般来说,混响室的最低使用频率要选在能产生至少 $60 \sim 100$ 个模以上的频率,这个频率一般要高于最低谐振频率的 3 倍以上。按照 RTCA DO-160 的衡量标准,混响室的最低可用频率取决于混响室内的场均匀性特性。混响室的尺寸、调谐器/搅拌器的效率和混响室的品质因数决定了混响室的最低可用频率。

(3) 谐振腔内存在的模数。对一个矩形谐振腔来说,内部谐振可能存在最多模的数量与矩形谐振腔的尺寸、频率有关,可以用式(9.2-4)进行估算

$$N(f) = \frac{8\pi}{3}abl \left(\frac{f}{c}\right)^3 - (a+b+l) \frac{f}{c} + \frac{1}{2} \quad (9.2-4)$$

式中: abl 为混响室的体积, m^3 ; f 是工作频率, Hz ; $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ 是电磁波传播速度。

(4) 混响室的品质因数。对于一个空载的混响室来说,其品质因数与工作频率、振荡模的形式有关,每一个模都有自己的 Q 值,当混响室内加入受试设备后,又会因加载而使 Q 值下降。

混响室的 Q 值还可以按式(9.2-5)进行测量和计算

$$Q' = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{\text{TX}} \eta_{\text{RX}} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{\text{Ave Rec}}}{P_{\text{input}}} \right\rangle \quad (9.2-5)$$

式中: V 为混响室体积, m^3 ; λ 为工作频率波长, m ; $\left\langle \frac{P_{\text{Ave Rec}}}{P_{\text{input}}} \right\rangle$ 表示在一个完整的调谐器/搅拌器周期内,平均接收功率与输入功率之比, $\langle \rangle$ 表示算术平均值; η_{TX} 和 η_{RX} 分别为发射(TX)天线和接收(RX)天线的天线效率。如果天线出厂时没有这个数据,则对数周期天线的效率可近

似取 0.75, 喇叭天线的效率可近似取 0.9。

(5) 混响室的品质因数带宽 (BW_Q)。混响室的品质因数带宽 BW_Q 是混响室中相关模式频带宽度的量度, 可用下式进行计算

$$BW_Q = f/Q \quad (9.2-6)$$

式中: f 为工作频率; Q 为混响室的品质因数。

(6) 混响室的工作区域。混响室的工作区域是指在搅拌器/调谐器完成一个周期的所有步位过程后, 区域内任一点处的电磁场强都可以达到相同的最大场强值, 也就是说这个区域内的电磁场强是统计均匀的、各向同性的场。一般来说, 工作区域定义在最低工作频率时离混响室墙壁、任一天线、调谐器或其他物体 $\lambda/4$ 距离的空间。对于工作在 100MHz 以上的混响室, 这个距离是 0.75m。

(7) 混响室的搅拌模式。

1) 机械搅拌模式。逐步增加搅拌器的转动角度, 在每一个转动位置处进行净输入功率、参考天线接收功率的测量, 同时记录场强探头测量的场强、被试件的响应等。每圈中必须具有的搅拌器转动位置数与频率和 Q 值有关, 样本数量要不小于 200, 搅拌器在每一个位置处停留的时间可控。

2) 离散频率搅拌模式。采用连续或步进旋转搅拌器的方式, 此时的采样速率 \gg 转速。样本的数量可很多, 达到 9999 个, 典型的转动周期为 1~12min。

3) 与离散频率搅拌模式相类似的连续频率搅拌模式, 快转速 (如 0.5s/r), 频谱仪处于最大保持状态, RBW 宽 (1~3MHz), 扫频速率快 (20~50ms/次)。

2.1.5.3 混响室的其他配置

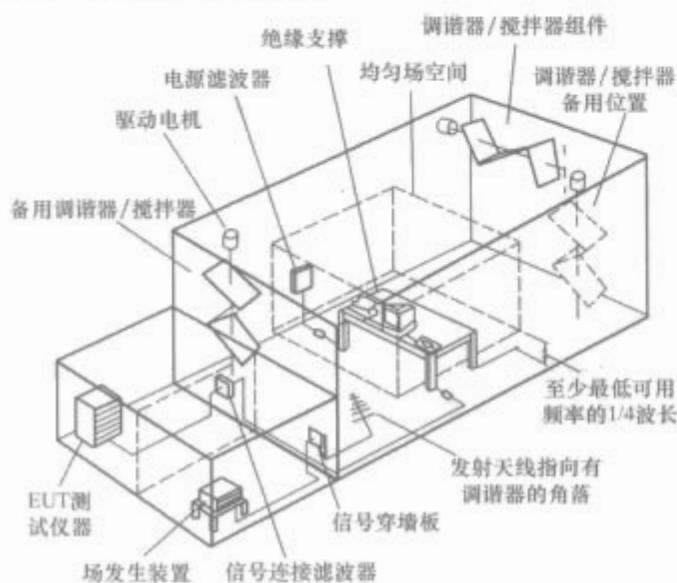


图 9.2-2 混响室布置示意图

混响室的其他配置包括: 自动场监测系统、双定向耦合器、大功率接收天线、发射天线、信号源、功率放大器、功率计、接收机或频谱仪、搅拌器的驱动和控制器等。

2.1.5.4 混响室内开展的各种试验和测量

目前利用混响室从事的试验和研究主要有: 设备的辐射敏感性试验、电缆的屏蔽效能试验、机箱的屏蔽效能试验、屏蔽衬垫等屏蔽效能测量、设备的辐射发射试验、天线效率测量等。

2.1.6 电磁缩尺模型实验场

电磁缩尺模型是采用几何尺度缩小的系统模型来测量系统电性能的方法。由于该方法能将实际电磁测试转化为简单、廉价、小巧的模型测试, 同时又能够保证足够的精度, 因而得到广泛的应用。20 世纪 40 年代末期, 美国首先将该

方法用于通信天线方向图预测。目前, 该方法不只用于天线性能 (方向图、耦合度、阻抗) 测量, 而且也用于预测天线及金属体周围的场强分布及大型电磁系统的电参数。

电磁缩尺模型实验设计应考虑下列因素:

(1) 缩尺比例选取。缩尺比例选取应考虑多种因素。若实尺天线较细时, 缩尺比例不宜取大, 以免模型天线不能自立。考虑到场地边缘效应缩尺比例不宜取小。

比较而言, 当缩尺比例取得大时, 场地误差减少, 天线发射频率增加, 功率降低, 模型成本也较低。但模型的精细部分加工困难, 处理不好可能带来较大误差。当缩尺比例取得小时, 天线阻抗、耦合度、天线电流及近场测试误差减小。根据不同具体情况, 缩比可分别选用为 3:1、10:1、20:1、50:1、100:1 等, 也可以同时采用几种缩尺比例进行测试, 以增加测试的可靠性。

(2) 模型发射功率。前面已述对于绝对模型, 模型辐射功率应为发射功率/缩比平方, 当预算模型信号源功率时, 还应考虑天线及其馈线损耗的影响。

(3) 金属电导率及磁导率对模型精度的影响。几倍缩尺模型中的金属构件, 其电导率应较实尺金属构件有几倍的提高, 这在实际中往往不易实现。例如: 在模型中采用铜构件模拟实尺铜构件时, 模型与实尺金属的电导率相同, 电导率的改变, 可能使天线阻抗发生变化, 并进而影响天线的近场乃至方向图和耦合度等。

对于长 $h=10m$ 的镀铜短波鞭天线, 其平均直径取为 $D=3cm$ 。用铜材分别制造 10:1、20:1、50:1、100:1 缩尺模型, 电导率变化所引起的天线阻抗改变是很小的, 即使是缩比取为 100, 其阻抗的变化也不超过 1%~2%。当天线直径缩小时, 电导率变化所引起阻抗的变化将增大, 例如当直径为 3mm, 取缩比为 50 时, 电导率变化引起的误差可能达 10。

导体的磁导率对电感影响甚小。实际上, 在高频情况下, 由于趋肤效应, 导体内基本没有磁场, 导体磁导率影响就很小。

2.2 电磁兼容测量设备

电磁兼容测量领域有很多专用的、为完成某种实验而特殊设计的设备。电磁兼容测量设备可分为两类: 一类用作接收, 接上适当的传感器可进行电磁干扰的测量; 另一类模拟不同干扰源, 通过适当的耦合/去耦网络、传感器或天线, 施加于各种被测设备, 用作敏感度或抗扰度的测量。

2.2.1 电磁干扰测试接收机

测试接收机与一般通信用的接收机有很大的不同。通信接收机是用于再现一个信号, 在接收这种信号时, 灵敏度和速度起着重要的作用。与此相反, 测试接收机是用来测试射频功率的幅度和频率, 它可能是干扰源, 也可能是信号的载波。因此, 对这种仪器的测量准确度提出了很高的要求。由于在干扰测量中经常出现具有不同带宽特性的信号, 所以对测试接收机的互调特性也有严格的要求。

通常也有用频谱分析仪来测量 EMI 的, 由于普通频谱仪没有预选滤波器且灵敏度低, 因而测量的数值是不准确的, 特别是对脉冲干扰的测量。无预选功能的频谱分析仪对宽带干扰信号的加权校正测量很繁琐且其输入不能提供测量宽带干扰信号所需的动态范围。为解决此问题, 可对频谱分析仪进行改进, 使它们满足上述要求。通过增加一些模块, 使原来的频谱仪类似一台接收机, 但通过按一个键即可简单地变回普通频谱分析仪。这类仪器 R&S 公司和 Agilent 公

司均有生产, 名称为接收机, 但实质上是由频谱仪改造而来的。

频谱分析仪改造的接收机与传统的 EMI 接收机相比有扫频测量速度快、覆盖同样频段的仪器体积小、价格相对便宜等优点, 对所关注的频段扫描测量后, 可直接给出频谱分布图形。因而, 越来越多的实验室选用频谱分析式接收机作为 EMI 测量用仪器。

接收机测量信号时, 先将仪器调谐于某个测量频率 f_i , 该频率经高频衰减器和高频放大器后进入混频器, 与本地振荡器的频率 f_l 混频, 产生很多混频信号。经过中频滤波器后仅得到中频 $f_0 = f_i - f_l$, 中频信号经中频衰减器、中频放大器后由包络检波器进行包络检波, 滤去中频得到低频信号 $A(t)$ 。 $A(t)$ 再进行进一步进行加权检波, 根据需要进行检波, 得到 $A(t)$ 的峰值(Peak)、有效值(Rms)、平均值(Ave)或准峰值(QP)。这些值经低频放大后可推动仪表指示或在数码管屏幕显示出来。

测量接收机测量的是输出到其端口的信号电压, 为测场强或干扰电流需借助一个换能器, 在其转换系数的帮助下, 将测到的端口电压变换成场强 (单位 $\mu\text{V}/\text{m}$ 或 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)、电流 (单位 A 或 $\text{dB}\mu\text{A}$) 或功率 (单位 W 或 dBm)。换能器依测量对象的不同可以是天线、电流探头、功率吸收钳或电源阻抗稳定网络等。

2.2.2 电磁干扰测试附件

2.2.2.1 电流探头

电流探头是测量线上干扰电流的卡式电流传感器, 测量时不需与被测的电源导线导电接触, 也不用改变电路的结构。它可在不打乱正常工作或正常布置的状态下, 对复杂的导线系统、电子线路等干扰进行测量。一般技术指标为: 测量频段 = $20\text{Hz} \sim 30\text{MHz}$, 输出阻抗 = 50Ω , 内环尺寸 = $32 \sim 67\text{mm}$ 。

电流探头为圆环形卡式结构, 能方便地卡住被测导线。其核心部分是一个分成两半的环形高磁导率磁心, 磁心上绕有 N 匝导线。当电流探头卡在被测导线上时, 被测导线充当一匝的一次线圈, 二次线圈则包含在电流探头中。

2.2.2.2 电源阻抗稳定网络

电源阻抗稳定网络 (也称人工电源网络) 在射频范围内向被测设备提供一个稳定的阻抗, 并将被测设备与电网上的高频干扰隔离开, 然后将干扰电压耦合到接收机上。

电源阻抗稳定网络对每根电源线提供三个端口, 分别为供电电源输入端、到被测设备的电源输出端和连接测量设备的干扰输出端, 结构示意图如图 9.2-3 所示。

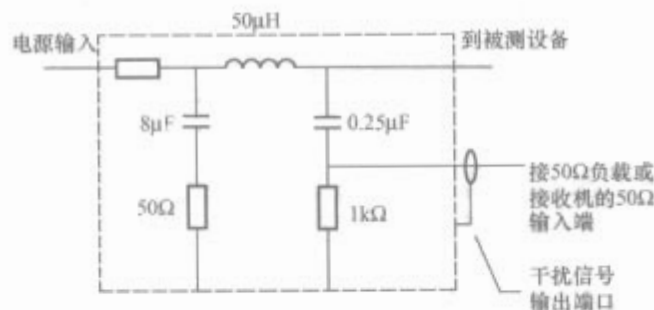


图 9.2-3 电源阻抗稳定网络结构示意图

电源阻抗稳定网络的阻抗是指干扰信号输出端接 50Ω 负载阻抗时, 在设备端测得的相对于参考地的阻抗的模。当干扰输出端没有与测量接收机相连时, 该输出端应接 50Ω 负载阻抗。图 9.2-3 为 $50\Omega/50\mu\text{H}$ 的 V 形电源阻抗稳定网络示意图, 适用频段 $0.15 \sim 30\text{MHz}$ (民用标准) 或 $0.01 \sim 10\text{MHz}$ (军用标准), 电源阻抗稳定网络还有其他的类型,

如 $50\Omega/5\mu\text{H}$ 等, 适用于不同标准要求。

除阻抗参数外, 电容修正系数也是其重要参数, 用于将接收机测量的端口电压, 转换成被测电源线上的干扰电压。

2.2.2.3 测量天线

天线是把高频电磁能量通过各种形状的金属导体向空间辐射出去的装置。同样, 天线亦可把空间的电磁能量转化为高频能量收集起来。

(1) 主要参数。

1) 输入阻抗 Z_A 。天线在馈电点的电压 U (V) 与电流 I (A) 之比, 表达式为

$$Z_A = \frac{U}{I} \quad (\Omega) \quad (9.2-7)$$

2) 天线系数 AF 。接收点的场强 E (V/m) 与此场强在该天线输出端生成的电压 U (V) 之比, 表达式为

$$AF = \frac{E}{U} \quad (1/\text{m}) \quad (9.2-8)$$

3) 天线增益 G 。指在观察点获得相同辐射功率密度时, 方向性天线的输入功率小于均匀辐射天线输入功率的倍数。天线增益除包含天线的方向性特征外, 还包含天线由输入功率转化为场强的转换效率。

4) 天线方向图。即用极坐标形式表示不同角度下天线方向性的相对值。其最大方向的轴线又称为前视轴。天线最大辐射方向与半功率点 (-3dB) 之间的夹角 θ 称天线波瓣的夹角。

5) 电压驻波比 (VSWR)。根据传输理论, 在传输线阻抗与负载阻抗不匹配的情况下, 必然引起输入波的反射, 驻波比是表征失配程度的系数, 表达式为

$$\text{VSWR} = \frac{1+\rho}{1-\rho} \quad (9.2-9)$$

式中: ρ 为反射系数。

(2) 天线计算中常用的公式。

1) 天线增益与天线系数的转换

$$C_{\text{dB}} = 20\lg f_{\text{MHz}} - AF_{\text{dB}}(m^{-1}) - 29.79 \quad (9.2-10)$$

2) 场强与发射功率转换公式 (远区场)

$$E_{\text{V/m}} = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{r} \quad (9.2-11)$$

式中: P_t 为发射功率, W; G_t 为发射天线增益; r 为远离发射点距离, m。

3) 环天线的基本关系式。设接收环天线的面积为 S , 匝数为 n , 当它置于平面波场中且天线平面与磁场方向垂直时, 环天线的感应电压为

$$e = 2\pi f \mu_0 S n H \quad (9.2-12)$$

式中: e 为天线感应电压, V; f 为被测磁场频率, Hz; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 为真空磁导率; S 为天线环面积, m^2 ; n 为环天线匝数; H 为磁场强度, A/m。

2.2.2.4 天线类型及参数

(1) 磁场天线。磁场天线用于接收被测设备工作时泄漏的磁场、空间电磁环境的磁场及测量屏蔽室的磁场屏蔽效能, 测量频段为 $25\text{Hz} \sim 30\text{MHz}$ 。根据用途不同, 天线类型分为有源天线和无源天线。通常有源天线因具有放大信号的作用, 非常适合测量空间的弱小磁场, 此类天线有带屏蔽的环天线。近距离测量设备工作时泄漏的磁场通常采用无源环天线, 与有源环天线相比, 无源环天线的尺寸较小。测量时, 环天线的输出端与测量接收机或频谱仪的输入端相连, 测量的电压值 ($\text{dB}\mu\text{V}$) 加上环天线的天线系数, 即得所测

磁场 (dBpT)。环天线的天线系数是预先校准出来的, 通过它才能将测量设备的端口电压转换成所测磁场。

(2) 电场天线。电场天线用于接收被测设备工作时泄漏的电场、环境电磁场及测量屏蔽室 (体) 的电场屏蔽效能, 测量频段为 10kHz~40GHz。根据用途不同, 天线分为有源天线和无源天线两类。电磁兼容测量中通常使用宽带天线, 配合测量接收机进行扫频测量。有源天线是为测量小信号而设计的, 其内部放大器将接收到的微弱信号放大至接收机可以测量的电平, 主要用在低频段, 测量天线的尺寸远小于被测信号的波长且接收效率很低的情况。下面介绍几种常用的电场天线。

1) 杆天线。天线杆长 1m, 用于测量 10kHz~30MHz 频段的电磁场, 形状为垂直的单极子天线, 由对称振子中间插入地网演变而来, 所以测试时一定要按天线的使用要求安装接地网 (板)。杆天线分为无源杆天线和有源杆天线, 区别在于测量的灵敏度不同。无源杆天线通过调谐回路分频段实现 50Ω 输出阻抗, 而有源杆天线则通过前置放大器实现耦合和匹配, 同时提高了天线的探测灵敏度。

2) 双锥天线。双锥天线的形状与偶极子天线十分接近, 它的两个振子分别为六根金属杆组成的圆锥形天线通过传输线平衡变换器将输出阻抗变为 50Ω。双锥天线的方向图与偶极子天线类似, 测量的频段比偶极子天线宽且无须调谐, 适合与接收机配合, 组成自动测试系统进行扫频测量。

3) 半波振子天线。半波振子天线主要由一对天线振子、平衡/不平衡变换器及输出端口组成。天线振子根据所测信号频率对应的波长, 将天线振子的长度调到半波长, 同时调节平衡/不平衡阻抗变换器 (50~75Ω), 使天线的输出端具有小的电压驻波比。

4) 对数周期天线。结构类似八木天线, 它上下有两组振子, 从长到短交错排列, 最长的振子与最低的使用频率相对应, 最短的振子与最高的使用频率相对应。对数周期天线有很强的方向性, 其最大接收、辐射方向在锥底到锥顶的轴线方向。对数周期天线为线极化天线, 测量中可根据需要调节极化方向以接收最大的发射值。它还具有高增益、低驻波比和宽频带等特点, 适用于电磁干扰和电磁敏感度测量。

5) 双脊喇叭天线。双脊喇叭天线的上下两块喇叭板为铝板, 铝板中间位置是扩展频段用的弧形凸状条, 两侧为环氧玻璃纤维的覆铜板, 并刻蚀成细条状, 连接上下铝板。双脊喇叭天线为线极化天线, 测量时通过调整托架改变极化方向。测量频段较宽, 可用于 0.5~18GHz 辐射发射和辐射敏感度测试。

6) 喇叭天线。喇叭天线中最常见的是角锥喇叭, 它的使用频段通常由馈电口的波导尺寸决定, 比双脊喇叭窄很多, 但方向性、驻波比及增益等均优于双脊喇叭天线, 在 1GHz 以上高场强 (如 200V/m) 的辐射敏感度测量中, 为充分利用放大器资源, 选用增益高的喇叭天线做发射天线, 较容易达到所需的高场强值。

2.2.2.5 功率吸收钳

功率吸收钳适用于 30~1000MHz 频段传导发射功率的测量。对于带有电源线或引线的设备, 其干扰能力可以用起辐射天线作用的电源线 (指机箱外部分) 或引线所提供的能量来衡量。当功率吸收钳卡在电源线或引线上时, 环绕引线放置的吸收装置能吸收到的最大功率, 近似等于电源线或引线所提供的干扰能量。

功率吸收钳由宽带射频电流变换器、宽带射频功率吸收体和受试设备引线的阻抗稳定器和吸收套筒 (铁氧体环附

件) 组成。电流变换器与电流探头的作用相当, 功率吸收体用于隔离电源与被测设备之间的功率传递, 吸收套筒则防止被测设备与接收设备之间发生能量传递。其中射频电流变换器、射频功率吸收体等做成可分开的两半, 并带有锁紧装置, 便于被测导线卡在其中, 又保证磁环的磁路紧密闭合。测量时, 功率吸收钳与辅助吸收钳配合使用。

2.2.2.6 天线塔与转台

辐射发射测量中, 部分测量标准要求测量天线在离地面 1~4m 的高度内可调节, 以便在每一个测试频率点获得最大的场强值。此外, 测量过程中还需转动被测设备, 以便对最大的辐射面进行测量。为达到此目的, 实验布置时, 将被测设备置于一个转台上, 手动或自动控制转台的旋转, 通过预测试, 确定最大的辐射方向, 然后再作进一步的定量测试。

用于 EMI 测量的转台由台板、传动装置与控制器组成, 直径一般为 1.2m, 有的为承载汽车等大型装备直径达 7~8m 或更大。转台表面可以是金属的, 也可以是非金属的。与电波暗室做在一起的转台表面是金属的, 台面也与暗室的金属地面齐平; 在金属地板上方, 用于放置小型被测设备的转台表面是非金属的, 其控制电路部分要求有良好的屏蔽, 以降低不必要的电磁泄漏, 使之不会对环境电平产生影响。

可升降天线塔由天线杆、升降装置及控制器组成, 具有完全自动化操作功能, 控制简便, 升降、定位精度高。其控制器具有 GPIB 接口, 可以很方便地加入各种自动测试系统中。由于控制器与天线塔和转台之间的控制线缆采用光纤, 而且对驱动电路采取屏蔽措施, 可大大降低天线塔的电磁发射, 也不会因线缆穿过屏蔽室的屏蔽墙, 而破坏屏蔽室的屏蔽效能。天线塔与转台如图 9.2-4 所示。

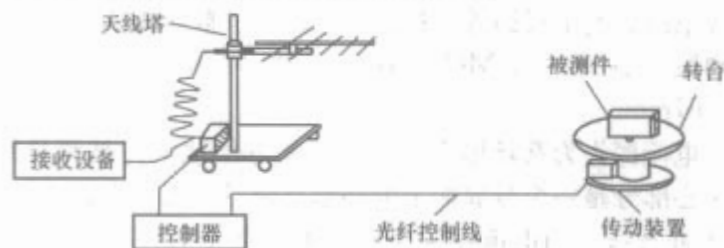


图 9.2-4 天线塔与转台

2.3 测量系统及测量软件

EMI 自动测量系统主要由测量接收机和各种测量天线、传感器及电源阻抗稳定网络组成, 用于测量电子、电气设备工作时泄漏出来的电磁干扰信号, 测量频段 20Hz~40GHz。干扰信号的传播途径分为两种: 一种是传导干扰, 通过电源线或互连线传播; 另一种是辐射干扰, 通过空间辐射传播。测量接收机借助不同的传感器测量传导和辐射干扰。如利用测量天线接收来自空间的干扰信号, 利用电流钳探测电源线上的干扰电流。对时域干扰, 如开关闭合产生的瞬态尖峰干扰, 则需通过示波器采样来捕捉。国军标电磁干扰自动测量系统的组成框图如图 9.2-5 所示。

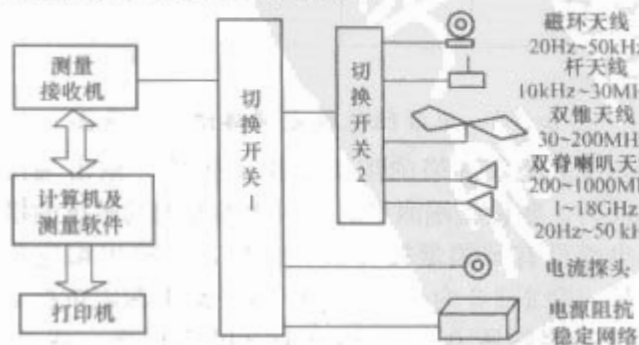


图 9.2-5 国军标电磁干扰自动测试系统组成框图

在常规的 EMI 测试中,测量软件有以下四大功能。

(1) 参数设置。包括测试标准的选择、测试配置提示、测量参数的设置;如测量频段、测量带宽、检波器、衰减器、扫频步进、每个测量点的驻留时间等。

(2) 控制仪器进行信号测量。以一定的步长和速率对信号进行扫频测量、判别和读出数据。

(3) 数据处理能力。测量软件自动将测量的信号电压转换成干扰的量值,即自动补偿因传感器的使用而引入的、随频率变化的校准系数,并可以用线性或对数频率坐标显示出干扰信号的频谱分布,同时自动与相应极限值进行比较,判别信号是否超标,并在图中表示出信号频谱与极限值的关系。软件还可以提供信号分析的基本能力,如仔细测量特殊频点信号的幅度和频率,给出与极限的差值,在小范围内实时复测等。

(4) 数据的存储和输出能力。测量软件能够将每次的测量数据列表存放,需要时提取,特别是传感器系数和极限值的数据存储,便于数据处理时调用。

2.4 电磁敏感度测量设备

用于电磁抗扰度或电磁敏感度测试的设备由三部分组成:①干扰信号产生器和功率放大器类设备;②天线、传感器等干扰信号辐射与注入设备;③场强和功率监测设备。以下分别介绍试验中常用的测试设备。

2.4.1 模拟干扰源

2.4.1.1 信号源

信号源在电磁兼容试验中有两个用途:①做系统校准的信号产生器;②用于敏感度试验中推动功率放大器产生连续波模拟干扰信号。电磁兼容试验对信号源的型号未做具体规定,性能不一定是高精度、高稳定度的,只要它能提供敏感度试验所需要的已调制或未调制的功率,输出幅度稳定,并满足以下要求即可。

(1) 频率精度。不低于 $\pm 2\%$ 。

(2) 谐波分量。谐波和寄生输出应低于基波 30dBc。

(3) 调制方式。具备调幅、调频功能,并且对调制类型、调制度、调制频率、调制波形可选择和控制。

2.4.1.2 尖峰信号产生器

尖峰信号产生器是对设备或分系统电源线进行瞬变尖峰传导敏感度实验必备的信号产生器,其测量对象是所有从外部给被测件供电的不接地交流或直流电源线,模拟被测件工作时开关闭合或故障引起的瞬变尖峰干扰。

测试标准对尖峰信号产生器的输出波形做了规定,GJB 151A—1997 规定的波形、幅值如图 9.2-6 所示,其中波形上升沿小于等于 $1\mu\text{s}$,下降时间约 $10\mu\text{s}$ 。标准波形在 0.5W 校准电阻上产生,接入测试电路之后,实际波形将由于负载的影响而发生变化。

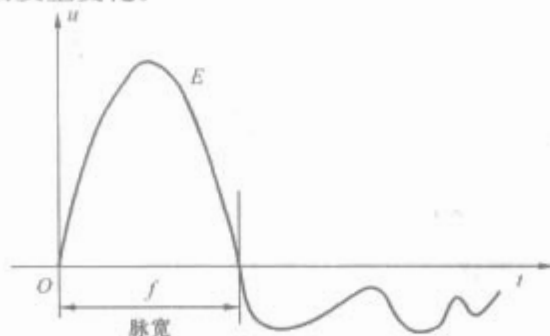


图 9.2-6 GJB 151A—1997 规定的尖峰信号波形、幅值

2.4.1.3 浪涌模拟器

在电网中进行开关操作及直接或间接雷击引起的瞬变过电压都会对设备产生单极性瞬变干扰,雷击浪涌测试仪就用于检验设备抵抗单极性浪涌的能力。

模拟单极性瞬态脉冲的浪涌模拟器主要由组合波信号发生器和耦合/去耦网络两部分组成,组合波信号发生器开路电压波形如图 9.2-7 所示,其技术指标如下:

(1) 电压范围: $500\sim 4000\text{V}$ 。

(2) 电压波形: $1.2/50\mu\text{s}$ (或 $10/700\mu\text{s}$)。

(3) 电流峰值: 2000A 。

(4) 电流波形: $8/20\mu\text{s}$ 。

(5) 极性: 正、负。

(6) 相位: $0\sim 360^\circ$ 。

(7) 耦合方式: L-N, L-PE, N-PE, L+N-PE。

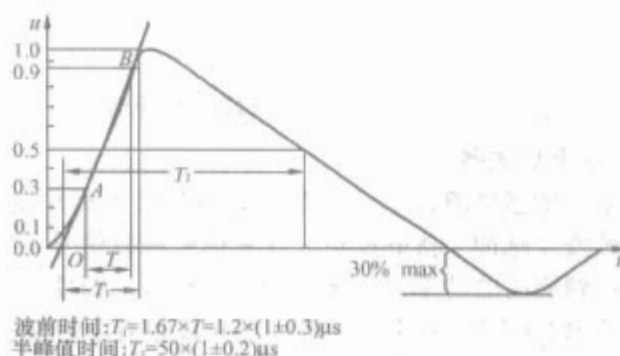


图 9.2-7 开路电压波形图

2.4.1.4 电快速瞬变脉冲产生器

用于产生一串脉冲,测试被测设备抗脉冲干扰的能力,评估电器和电子设备的供电端口、信号端口和控制端口在受到重复的快速瞬变脉冲干扰时的性能。在电源线、信号线和控制线上出现的脉冲群干扰常具有上升时间短、重复频率高、能量低的特点,会对电子设备产生骚扰。

电快速瞬变脉冲发生器的主要元器件有:高压源、充电电阻、储能电容器、放电器、脉冲持续时间成形器、阻抗匹配负载和隔直电容。电快速瞬变脉冲的波形如图 9.2-8 所示,电快速瞬变脉冲发生器技术指标如下:

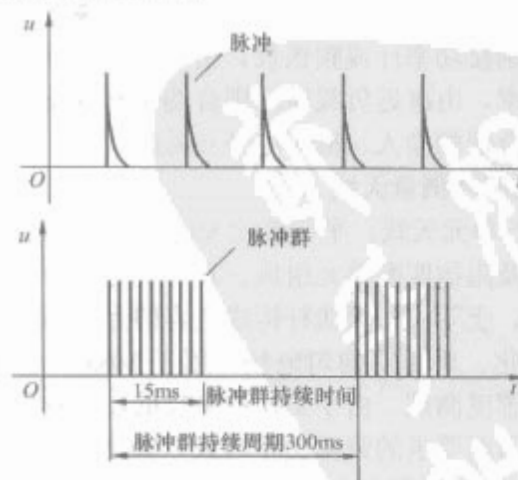
(1) 测试电压: $220\sim 8000\text{V}$ 。

(2) 波形: 上升时间 5ns 。

(3) 脉冲串宽度: 50ns 。

(4) 脉冲串重复频率: $0.1\text{kHz}\sim 1\text{MHz}$ 。

(5) 内置耦合网络。



2.4.1.5 静电放电模拟器

静电放电是指具有不同静电电位的物体相互靠近或直接接触引起的电荷转移现象,它发生在操作者及其邻近物体之

间。静电放电模拟器可模拟自然产生的静电，用于考核电子、电气设备遭受静电放电时的性能。模拟试验在设备的输入、输出连接器、机壳（不接地的）、键盘、开关、按钮、指示灯等操作者易于接近的区域进行。静电放电模拟器由高压产生器和放电头组成，如图 9.2-9 所示，主要指标如下：

- (1) 放电电压：空气放电 200V~16.5kV，接触放电 200V~9kV。
- (2) 保持时间：>5s。
- (3) 放电模式：空气、接触放电。
- (4) 极性：正、负。
- (5) 操作模式：单次、连续放电。

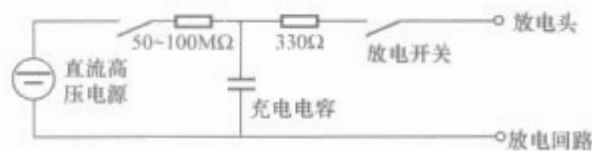


图 9.2-9 静电放电模拟器电路原理图

2.4.2 功率放大器

在电磁敏感度测试中，功率放大器是必不可少的设备，对于连续波及脉冲干扰的模拟，仅靠信号源或信号发生器往往难以达到所需的功率以及宽泛的测量频段，即使有些功率源能够输出 200W 的功率，但覆盖的频段很有限且输出阻抗要求很小才能得到高的功率。用功率放大器来提升信号的功率是一个很好的办法，并且可根据需要分频段将功放增益做得很高，以达到高的辐射场强或在线上注入强干扰电流的目的。

电磁兼容测试用功放一般为 50Ω 输入、输出阻抗，与传感器是匹配的，只有音频放大器输出阻抗为 2Ω、4Ω 或 8Ω，通常与耦合变压器或环天线相连。放大器因器件特性的限制，单台不可能覆盖全部测量频段，如在 10kHz~18GHz 的测量频率范围内，需 5~6 台覆盖。1GHz 以下用固态放大器，而 1GHz 以上需采用行波管放大器。行波管放大器是有使用寿命的，一般为 4000h 左右。功率放大器对负载端的驻波极为敏感，负载匹配良好是得到较大输出功率的基本条件。

2.4.3 测试附件

2.4.3.1 大功率定向耦合器

定向耦合器是功率测量的常用部件，它是一种无耗的三端/四端网络，有一个耦合端的称单定向耦合器，有两个则称双定向耦合器。当输入端接功率源，输出端接负载后，两个耦合端分别接功率计或频谱仪，由靠近输入端的耦合端 3 测量前向功率，由靠近负载端的耦合端 4 测量反向功率。小功率定向耦合器的输入、输出端是互易的。

2.4.3.2 敏感度测量天线

(1) 平行单元天线。平行单元天线为电场发射天线，由四根天线杆及阻抗匹配单元组成。其产生电场的原理与平板电容器相似，上下两排天线杆构成电容的上下两个极板，中间产生线极化、垂直的均匀电场，用于 10kHz~30MHz 频段的辐射敏感度测试。由于工作频率较低，天线尺寸远小于工作波长，因而要求的驱动功率较大，如在距离天线 1m 处产生 20V/m 的场强需 1000W 的功率放大器支持。平行单元天线示意图如图 9.2-10 所示。

(2) 磁环天线。磁场发射环产生 20Hz~50kHz 的磁场，用于 EMC 的磁场敏感度试验。测试时，磁环天线串联 1Ω 的限流电阻，并与信号源相连以产生期望的驱动电流，由电流探头和测量接收机监测流过天线回路的电流，计算磁环天

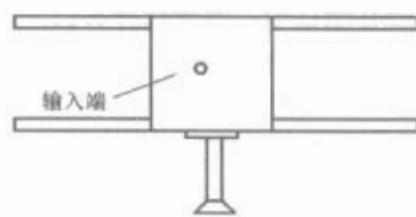


图 9.2-10 平行单元天线示意图

线发射的磁通密度。磁环发射天线示意图如图 9.2-11 所示。

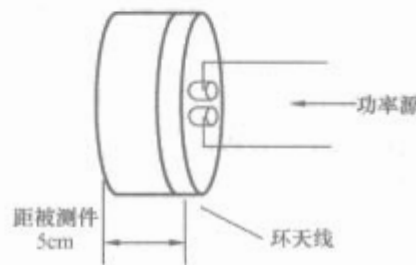


图 9.2-11 磁环发射天线示意图

2.5 敏感度测试系统及测量软件

EMS 测试系统涉及的仪器较多，主要由各种模拟干扰源、功率放大器、发射天线、传感器、功率监测和计算机及测量软件组成，用于测量电子、电气设备在施加模拟干扰时的抗干扰能力，测量频段 20Hz~40GHz。测试分为两种：一种是传导抗扰度，通过电源线或互连线施加干扰；另一种是辐射抗扰度，干扰电磁场通过空间辐射，照射到被测设备上。各种模拟干扰源借助不同的传感器产生所需的干扰信号，如利用发射天线向被测设备辐射电场或磁场干扰，利用注入电流探头在电源线上产生干扰电流。测量系统通过计算机控制大部分测试项目的进行，自动加入天线和传感器的修正系数，自动调节施加的干扰信号或电磁场的大小，并实时监视功率输出，保证放大器安全工作，生成测试报告和曲线，使复杂烦琐的测试易于操作和实施。辐射敏感度测量示意图如图 9.2-12 所示。

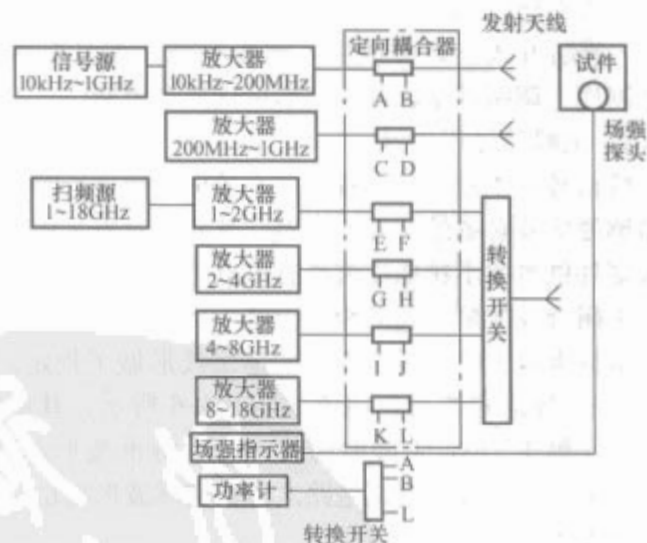


图 9.2-12 辐射敏感度测试示意图

3 设备、分系统电磁兼容性测量

3.1 军用船舶设备、分系统的电磁兼容性要求

3.1.1 项目概述

表 9.2-2 列出了军用船舶设备和分系统电磁兼容性的电磁发射和敏感度要求项目。为证实符合这些要求而进行试验的全部结果均应写入电磁兼容性试验报告中，用于设备或分系统的评估。所有频域极限值都由测量接收机的峰值包络检

波输出来表示，并用与其相同指示的正弦波均方根值来定标。

表 9.2-2 电磁发射和敏感度要求项目	
项 目	名 称
CE101	25Hz~10kHz 电源线传导发射
CE102	10kHz~10MHz 电源线传导发射
CE106	10kHz~40GHz 天线端子传导发射
CS101	25Hz~50kHz 电源线传导敏感度
CS103	15kHz~10GHz 天线端子互调传导敏感度
CS104	25Hz~20GHz 天线端子交调传导敏感度
CS105	25Hz~20GHz 天线端子交调传导敏感度
CS106	电源线尖峰信号传导敏感度
CS109	50Hz~100kHz 壳体电流传导敏感度
CS114	10kHz~400MHz 电缆束注入传导敏感度
CS116	10kHz~100MHz 电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感度
RE101	25Hz~100kHz 磁场辐射发射
RE102	10kHz~18GHz 电场辐射发射
RE103	10kHz~40GHz 天线谐波和失真输出辐射发射
RS101	25Hz~100kHz 磁场辐射敏感度
RS103	10kHz~40GHz 电场辐射敏感度
RS105	瞬变电磁场辐射敏感度

3.1.2 电磁干扰控制要求与预定安装的关系

对预定安装在水面船舶与潜艇设备和分系统的要求项目为 CE101、CE102、CS101、CS114、CS116、RE101、RE102、RS101、RS103；对于带天线的设备，拟选 CE106、RE103、CS103、CS104、CS105、CS106，由订购单位在订购规范中对适用性和极限要求作详细规定；CS109 适用于工作频率小于或等于 100kHz，工作灵敏度等于或优于 1μV（如 0.5μV）的设备和分系统。

3.1.3 电磁发射和敏感度要求

(1) CE101。本要求适用于下述交、直流电源线（包括返回线，但不包括 EUT 电源的输出端导线）。

1) 直流电源线传导发射。当负载电流≤3A 时，不应超过表 9.2-3 规定的极限值；负载电流在 3~185A 之间，放宽极限值 20lg(I/3)；负载电流≥185A，放宽极限值 35dB。

表 9.2-3 CE101 极限 (DC)	
频 率	极限值
25Hz~2.6kHz	95dBμA
2.6~10kHz	95~76dBμA

2) 交流电源线（50Hz）传导发射。对于不同设备和分系统电源情况下的极限值见表 9.2-4，在设备或分系统的基波电流>1A 情况下，按 20lg（基波电流）放宽表中极限值。

表 9.2-4 CE101 极限 (50Hz)		
适用条件	频 率	极限值
设备和分系统电源≤1kV	50Hz~10kHz	120~76dBμA
	100Hz~1.9kHz	90dBμA
设备和分系统电源≥1kV	1.9~10kHz	90~76dBμA

3) 交流电源线（400Hz）传导发射。在设备和分系统电源≤0.2kV（多项电源）或 I≤2A（单项电源）情况下，用表 9.2-5 列极限值，在设备或分系统的基波电流>1A 情况下，按 20lg（基波电流）放宽表 9.2-5 列极限值。

表 9.2-5 CE101 极限 (400Hz)		
适用条件	频率	极限值
设备和分系统电源≤0.2kV（多项电源）或 I≤2A（单项电源）	400Hz~10kHz	120~92dBμA
设备和分系统电源≥0.2kV（多项电源）或 I≥2A（单项电源）	800Hz~10kHz	90dBμA

(2) CE102。本要求适用于所有电源导线（包括返回线，但不包括 EUT 电源的输出端导线），频率范围从 10kHz~10MHz。28V 电源线传导发射不应超过表 9.2-6 规定的极限值。110V 电源线在基准极限值基础上放宽 6dB，220V 放宽 9dB，380V 放宽 11dB，440V 放宽 12dB。

表 9.2-6 CE102 极限 (AC 和 DC)	
频 率	基准极限值
10~500kHz	94~60dBμV
500kHz~10MHz	60dBμV

(3) CE106。本要求适用于发射机和接收机天线端子，不适用于不能拆卸的固定式天线设备。对受试发射机（发射状态）必要的带宽内或其基频的±5%范围内不适用。依据 EUT 工作频率范围，试验起始频率和极限见表 9.2-7。对于带工作天线的受试发射机，可以使用 RE103 要求来代替 CE106。

表 9.2-7 CE106 起始频率和极限		
工作频率范围 (EUT)	试验起始频率①	极限
10kHz~3MHz	10kHz	接收机：34dBμV
3~300MHz	100kHz	发射机（待发状态）：34dBμV
300MHz~3GHz	1MHz	发射机（发射状态）②；
3~40GHz	10MHz	80dB 或 50+10lgP 的抑制

① 试验上限频率为 40GHz 或 EUT 最高工作频率的 20 倍，取其较小者。对于使用波导的设备，当频率低于波导截止频率的 0.8 倍时，本要求不适用。

② 发射机处于发射状态时，除二次和三次谐波以外的所有谐波发射和失真发射均应至少低于基波电平 80dB，二次和三次谐波应抑制 50+10lgP（P 为基波峰值输出功率，W）或 80dB，取抑制要求较小者。

(4) CS101。本要求适用于设备和分系统的交流和直流输入电源线，不包括回线。如果 EUT 是以直流电源工作的，本要求适用于 25Hz~50kHz。如果 EUT 是以交流电源工作的，当按表 9.2-8 对 CS101-1 规定的试验信号电平进行试验时，EUT 不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指标值或超出单个设备和分系统规范中给出的指标容差。如果采用 GJB 152A 规定的功率源，当在 0.5Ω 负载上耗散功率调整到 80W 时，若试样电源输入端电压仍达不到所要求的值，只要试样对此功率信号源的输出不敏感，则也认为满足本要求。

表 9.2-8 CS101 极限 (AC 和 DC)

频 率	基准极限值	
	额定电源电压>28V	额定电源电压≤28V
25Hz~5kHz	136dB _μ V	126dB _μ V
5~50kHz	136~116dB _μ V	126~106dB _μ V

(5) CS103。当订购规范有规定时,本项接收机前端敏感度要求适用于接收设备和分系统,如通信接收机、射频放大器、无线电收发信机、雷达接收机、声学接收机以及电子对抗装备接收机等,当按订购方提供的极限要求和试验方法进行试验时,EUT 不应出现超过规定容限的任何互调产物。

(6) CS104。当订购规范有规定时,本项接收机前端敏感度要求适用于接收设备和分系统,如通信接收机、射频放大器、无线电收发信机、雷达接收机、声学接收机以及电子对抗装备接收机等。当按订购方提供的极限要求和试验方法进行试验时,EUT 不应出现超过规定容限的任何不希望有的响应。

(7) CS105。当订购规范有规定时,本项接收机前端敏感度要求仅适用于通常处理调幅射频信号的接收机。当按订购方提供的极限要求和试验方法进行试验时,EUT 不应由于交调而出现超过规定容限的任何不希望有的响应。

(8) CS106。本要求适用于所有 EUT 的电源线。将 400V、脉冲宽度≤5μs 的尖峰信号加到 EUT 的交直流电源线上时,EUT 不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指标值,或超出单个设备和分系统规范中给出的指标容差。

(9) CS109。本要求适用于工作频率小于或等于 100kHz 及工作灵敏度等于或优于 1μV (如 0.5μV) 的设备和分系统,不适用于手持式设备。当按表 9.2-9 所示 CS109 极限数值进行试验时,EUT 不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指标值及超出单个设备和分系统规范中给出的指标容差。

表 9.2-9 CS109 极 限

频 率	基准极限值
50~400Hz	120dB _μ A
400Hz~20kHz	120~103dB _μ A
20~100kHz	103~60dB _μ A

(10) CS114。在下列频率内,根据预定安装的不同,本要求适用于 10kHz~400MHz 设备或分系统的所有互连电缆,包括电源电缆在内。应从表 9.2-10 中选取 CS114-1 中的适用极限曲线。当按表 9.2-11 所示校准电平的试验信号进行试验时,EUT 不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指标值及超出单个设备和分系统规范中给出的指标容差。如果受试电缆感应出下述电流而 EUT 不敏感时,也算满足要求:曲线 a 为 83dB_μA,曲线 b 为 89dB_μA,曲线 c 为 103dB_μA,曲线 d 为 115dB_μA。

表 9.2-10 CS114 极限值适用范围

频率范围	所有舰船 (甲板上)	金属舰船 (甲板下)	非金属舰船 (甲板下)	潜艇
10kHz~2MHz	b	b	b	a
2~30MHz	d	b	c	a
30~200MHz	d	b	b	a
200~400MHz	d	b	b	a

表 9.2-11 CS114 极 限

曲线	频 率	基准极限值
a	10kHz~1MHz	37~77dB _μ A
	1MHz~30MHz	77dB _μ A
	30MHz~400MHz	77~65dB _μ A
b	10kHz~1MHz	43~83dB _μ A
	1MHz~30MHz	83dB _μ A
	30MHz~400MHz	83~71dB _μ A
c	2MHz~30MHz	97dB _μ A
	30MHz~400MHz	97~85dB _μ A
d	10kHz~1MHz	69~109dB _μ A
	1MHz~30MHz	109dB _μ A
	30MHz~400MHz	109~97dB _μ A

(11) CS116。本要求适用于包括电源电缆和单根电源导线在内的所有互连电缆,但无需单独对电源回线试验。当按图 9.2-13 规定的信号波形和表 9.2-12 规定的最大电流(在校准装置上读取的电流值)进行试验时,EUT 不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指标值或超出单个设备和分系统规范中给出的指标容差。至少应在 0.01、0.1、1、10、30、100MHz 频率上和在按 GJB 152A—1997 确定的谐振频率上进行试验。试验信号的重复率为 0.5~1pps。在每个频率点应施加脉冲 5min。

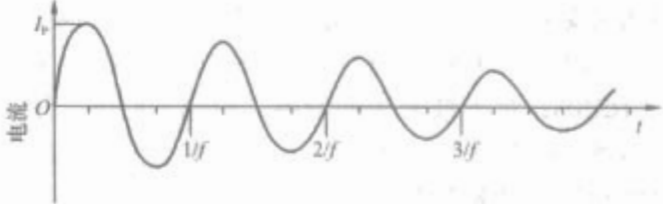


图 9.2-13 CS116 阻尼正弦波形

图 9.2-13 中规格化的波形为

$$I(t) = I_0 e^{-\pi f t / Q} \sin(2\pi f t) \tag{9.2-13}$$

式中: f 为试验频率; t 为时间; $Q=15\pm5$ 为阻尼因子,可按下式确定

$$Q = \frac{\pi(n-1)}{\ln(I_P/I_N)} \tag{9.2-14}$$

式中: Q 为阻尼因子; N 为周期数; I_P 为第 1 周期峰值电流; I_N 为第 N 周期峰值电流; \ln 为自然对数。

表 9.2-12 CS116 极 限

频 率	基准极限值 I_P
10kHz~1MHz	100~140dB _μ A
1~30MHz	140dB _μ A
30~100MHz	140~130dB _μ A

(12) RE101。本要求适用于设备和分系统壳体 and 所有互连电缆的辐射发射。本要求不适用于通信发射机的基频,但适用于声纳、工业、科学、医疗设备和分系统的工作频率,不适用于天线的辐射。对于海军飞机,本要求只适用于反潜飞机。在规定的 7cm 和 50cm 距离上测试,磁场辐射发射不应超过表 9.2-13 规定的极限值。

表 9.2-13 RE101 适用于海军设备的极限

测试距离	频 率	基准极限值
7cm	25~60Hz	165dBpT
	60~400Hz	165~155dBpT
	400Hz~2kHz	155~112dBpT
	2~100kHz	112~78dBpT
50cm	25~60Hz	131dBpT
	60~400Hz	131~121dBpT
	400Hz~2kHz	121~78dBpT
	2~100kHz	78~44dBpT

(13) RE102。本要求适用于设备和分系统壳体 and 所有互连电缆的辐射发射。本要求不适用于发射机的基频或天线的辐射。本要求适用频率范围：潜艇为 10kHz~1GHz，水面舰船为 10kHz~18GHz。试验频率上限为 1GHz~EUT 最高工作频率的 10 倍，取较大者，18GHz 以上不要求测量。电场辐射发射不应超过表 9.2-14 的 RE102 极限值。

表 9.2-14 RE102 极限值

频 率	基准极限值
10kHz~100MHz	70~36dB μ V/m
100MHz~18GHz	36~82dB μ V/m

(14) RE103。当试验带有固定天线的发射机时，本要求可用来替代 CE106。本要求不适用于 EUT 必要的带宽或基频的±5%范围内（取其较宽者）。根据 EUT 的工作频率范围，试验起始频率同 CE106。

试验上限频率为 40GHz 或 EUT 最高工作频率的 20 倍，取其较小者。对于采用波导的设备，当频率低于波导截止频率的 0.8 倍时，本要求不适用。除二次和三次谐波以外，所有谐波发射和乱真发射至少应比基波电平低 80dB。二次和三次谐波应抑制 50+10lgP（P 为基波峰值输出功率，W）或 80dB，取抑制要求较小者。

(15) RS101。本要求适用于设备和分系统壳体及所有互连电缆。本要求不适用于 EUT 的天线。当按表 9.2-15 所示 RS101 极限值的磁场进行试验时，EUT 不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指标值及超出单个设备和分系统规范中给出的指标容差。

表 9.2-15 RS101 极限值

频 率	基准极限值
25~60Hz	175dBpT
60~400Hz	175~165dBpT
400Hz~2kHz	165~122dBpT
2~100kHz	122~88dBpT

(16) RS103。本要求适用于设备和分系统壳体及所有互连电缆。适用范围 10kHz~40GHz，除非订购单位另有规定，本要求不适用于连接天线的接收机调谐频率。当按表 9.2-16 规定的辐射电场进行试验时，EUT 不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指标值及超出单个设备和分系统规范中给出的指标容差。在 30MHz 以下，对垂直极化场应满足要求；在 30MHz 以上，对水平极化和垂直极化场均应满足要求。本要求对圆极化场不适用。

表 9.2-16 RS103 极限值电平

频率范围	所有舰船 (甲板上)	金属舰船 (甲板下)	非金属舰船 (甲板下)	水下
10kHz~2MHz	10V/m	10V/m	10V/m	5V/m
2~30MHz	200V/m	10V/m	50V/m	5V/m
30~1000MHz	200V/m	10V/m	10V/m	5V/m
1~18GHz	200V/m	10V/m	10V/m	5V/m
18~40GHz	200V/m	10V/m	10V/m	5V/m

(17) RS105。当设备或分系统位于加固（屏蔽）平台或设施的外部时，本要求适用于设备和分系统壳体。当订购方有规定时，本要求也适用于只预定使用非金属平台的设备。当按图 9.2-14 所示的脉冲信号极限值进行试验时，EUT 不应出现任何故障、性能降低或偏离规定的指示值及超出单个设备和分系统规范中给出的指示容差。

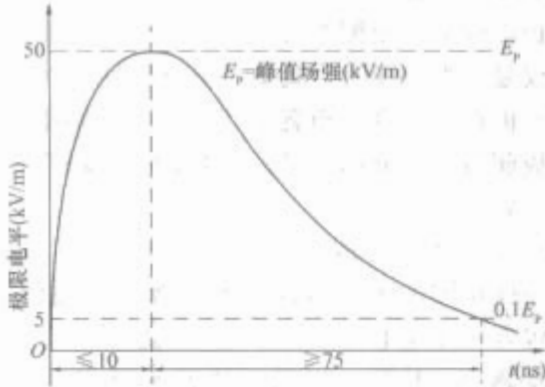


图 9.2-14 RS105 波形

3.2 测试方法

本方法规定了电子、电气和机电设备及分系统电磁发射和敏感度特性的测量方法，用于测量并确定电子、电气和机电设备及分系统是否符合极限值的规定。

3.2.1 一般要求

对测量系统误差、电磁环境电平、测试场地等要求应符合 GJB 152A—1997《军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》的相关要求。

3.2.2 EUT 测试配置

EUT 的测试配置应符合 GJB 152A—1997《军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》中的图 1~图 5 通用测试配置的要求。除非对特定的测试方法另外给出明确指示，否则在整个测试期间都应保持上述配置。对通用测试配置的任何变更，都应在单项测试方法中特别加以说明。

3.2.2.1 EUT 的搭接

(1) 只有 EUT 设计和安装说明中有规定时，设备外壳和安装基座等才能搭接在一起或将其搭接在接地平板上。当测试安装需要搭接条时，所用搭接条应与实际安装规定的搭接条相同。通过电源电缆安全接地线接地的便携式设备，应按照相应测试方法的规定接地。

(2) 如果 EUT 安装时使用具有振动和冲击减振器的基座，则 EUT 必需紧固在基座上。当安装基座备有搭接条时，应搭接到接地平板上；当安装基座没有搭接条时，则在测试配置中不应使用搭接条。

(3) 在 EUT 上有供接地的外部接线端子或连接插头的情况下，若该端子在设备中通常是接地的，则应把该端子接到接地平板上；如果该端子安装条件不明，则不应接地。

3.2.2.2 EUT 取向

应将 EUT 产生最大辐射发射的那一面或对辐射信号最易产生响应的那一面朝向测试天线。EUT 应安装于接地平板前缘 100mm±20mm 处,以便为电缆敷设提供足够的空间。

3.2.2.3 EUT 电缆的构成和敷设

电缆敷设应模拟实际的安装和使用情况。仅在安装图中已规定的情况下才应使用屏蔽电缆或电缆内屏蔽线(包括电源线和地线)。应按安装要求检查电缆以确定是否采用正确敷设形式,如使用对绞、屏蔽和屏蔽端接等。

(1)互连线和电缆。单独互连线应按实际安装中同样的方式组合成电缆。在测试配置中整个互连电缆的长度应与实际平台安装的长度一致。如果电缆长度超过 10m,则电缆至少应取 10m。当电缆长度在安装中没有规定时,电缆应足够长以满足规定的条件。每根互连电缆至少有 2m(除非实际安装中的电缆长度比 2m 短)平行于配置前缘边界敷线,剩下的电缆长度应牵引至配置后面,以 Z 字形放置。当敷设中使用的不仅是一根电缆时,则电缆外缘间距应为 20mm。当采用接地平板在工作台上布置 EUT 时,最靠前的电缆应放在接地平板前沿 100mm 处。所有电缆都应支撑在接地平板上方 50mm 处。

(2)EUT 输入电源线。2m 长输入电源线(包括回线)应按与互连线相同的方式敷设。电源线应连接到 LISN 上。当电源线包含在互连电缆中时,电源线应从 EUT 连接器上分出,在暴露 2m 长后,以最短距离连接到 LISN 上,从 EUT 连接器到 LISN 的电源线总长度不应超过 2.5m。所有电源线都在接地平板上方 50mm 处。如果电源线在实际安装中是对绞的,则它们在连接到 LISN 以前也应对绞。

3.2.2.4 电气和机械接口

所有的电气输入和输出接口应连接到安装在平台上的实际设备上,或连接到能模拟实际安装中呈现电特性(阻抗、接地、平衡、功率等)的负载上,应将输入信号施加到有关接口上以使 EUT 所有电路工作,具有机械输出的 EUT 应加载。当在实际安装中存在可变的电气或机械负载时,则应在预期最恶劣情况下测试。当使用有源电气负载(如测试设备)时,应采取措施以保证有源负载满足有关电磁环境要求且有源负载不应响应敏感性测试信号。带有天线端口的 EUT,其天线端口应端接屏蔽的匹配负载。测量在 EUT 典型额定状态下进行。

3.2.3 EUT 的工作

对发射测量,EUT 应在易产生最大发射的状态下工作;对敏感度测量,EUT 应在其最敏感的状态下工作。对具有几种不同状态(包括用软件控制的状态),应对发射和敏感度进行足够的多种状态测试,以便对所有的电路进行评估。

3.2.3.1 可调谐射频设备的工作频率

测试应在下述情况下进行:在每个调谐频段、可调谐单元或固定频道范围内,EUT 都应工作在不少于三个频率上。其中一个为频带的中心频率,另外两个是距每个频带或频道范围高端-5%、低端+5%的频率。

3.2.3.2 扩频设备的工作频率

两种典型的扩展频谱设备的工作要求如下:

(1)跳频。测试应在 EUT 采用一个包括整个可能频率范围的 30%跳频模式下进行。跳频在 EUT 的工作频率范围内等分成低、中和高三段。

(2)直接序列。测试应在 EUT 以最高可能的数据传输速率进行数据处理时进行。

3.2.3.3 敏感度监测

在敏感度测试期间应监测 EUT 是否性能降低或误动作。监测通常使用机内自检(BIT)、图像和字符显示、音响输出以及其他信号输出和接口的测量来实现。在 EUT 中安装专门电路来监测 EUT 性能是允许的,但这些改动不应影响测试结果。

3.2.4 测试设备的使用

测试设备应符合本标准单项测试方法的规定。任何选频测量接收机,只要其性能(如灵敏度、带宽选择、检波功能、动态范围和工作频率等)满足本标准规定的要求,并能充分证明满足 GJB 151A—1997 规定的极限值,则都可用于进行本标准规定的测试。

3.2.4.1 检波器

峰值检波器应在整个频域的发射和敏感度测量中使用,用以在接收机通带内检测调制包络的峰值。接收机用能产生相同峰值指示的正弦波(已调谐未调制)的均方根值定标。当其他测量仪器如示波器、非选频电压表或宽带场强计等用于敏感度测量时,则需对测试信号加以修正,以便将读数修正到在调制包络峰值情况下的等效均方根值。

3.2.4.2 发射测试

(1)带宽。发射测量应采用表 9.2-17 中列出的测量接收机带宽。该带宽是接收机总选择性曲线 6dB 带宽。不应使用视频滤波器限制接收机响应。如果接收机有可控的视频带宽,则应将它调到最大值;若测量接收机没有表 9.2-17 规定的带宽,测试时使用尽量接近的带宽,并对测量数据加以分析说明,不得使用理论上的带宽修正系数。

(2)频率扫描。对发射测量,应对每个适用的试验在整个频率范围内进行扫描。在进行发射测试时,模拟式测量接收机的最小测量时间见表 9.2-17。数字式接收机扫描步长应小于或等于半个带宽且驻留时间应符合表 9.2-17 规定。表 9.2-17 规定不足以捕捉 EUT 最大发射幅度和满足频率分辨率要求,则应采用更长的测量时间和更低的扫描速率。

表 9.2-17 带宽和测量时间

频率范围	6dB 带宽	驻留时间 (s)	模拟式接收机 最小测量时间
30Hz~1kHz	10Hz	0.15	0.015s/Hz
1~10kHz	100Hz	0.015	0.015s/kHz
10~250kHz	1kHz	0.015	0.015s/kHz
250kHz~30MHz	10kHz	0.015	1.5s/MHz
30MHz~1GHz	100kHz	0.015	0.15s/MHz
>1GHz	1MHz	0.015	15s/GHz

3.2.4.3 敏感度测试

(1)频率扫描。对敏感度测量,应对每个适用的试验在整个频率范围内进行扫描。在敏感度扫描测试中,信号源的扫描速率和频率步长不应超过表 9.2-18 所示值。该速率和步长由信号源调谐频率(f_0)和倍乘因子确定。模拟式扫描是指连续调谐的信号源,而步进式扫描是指相继地调谐在离散频率点上的频率合成信号源。步进式扫描在每一调谐频率上至少驻留 1s。对某些 EUT 为可靠观察响应,必要时应降低扫描速率和减少步长。

表 9.2-18 敏感度扫描参数		
频率范围	模拟式扫描 最大扫描速率	步进式扫描 最大步长
30Hz~1MHz	$0.02 f_0/s$	$0.01 f_0$
1~30MHz	$0.01 f_0/s$	$0.005 f_0$
30MHz~1GHz	$0.005 f_0/s$	$0.002 f_0$
1~8GHz	$0.002 f_0/s$	$0.001 f_0$
8~40GHz	$0.001 f_0/s$	$0.0005 f_0$

(2) 敏感度信号调制。10kHz 以上的敏感度测试信号，除非在本标准的单项测试方法里另有说明 1kHz 的速率、50% 的占空因数进行脉冲调制。

(3) 敏感度门限电平。当 EUT 在测试中出现敏感现象时，应在敏感现象刚好不出现的情况下确定敏感度门限电平。敏感度门限电平应按下列步骤确定：

- 1) 当敏感现象存在时，降低干扰信号直到 EUT 恢复正常。
- 2) 在 1) 步骤基础上再降低干扰信号 6dB。
- 3) 逐渐增加干扰信号直到敏感现象重复出现，此时干扰信号电平即为敏感度门限电平；
- 4) 记下 3) 步骤门限电平、频率范围、最敏感的频率和电平以及其他适用的测试参数。

3.2.5 测试设备和天线校准

按照 GJB 152A—1997 测量所要求的测量设备和附件，应按规定的方法进行校准。除采购单位另有规定或出现损坏的情况要进行校准外，对特别是测试环路中使用的测试天线、电流探头、场传感器及其他装置应至少每两年校准一次。应按照每个附件特有的原理和方法确定天线系数和电流探头传输阻抗。

3.2.5.1 测试系统检验

在每次发射测量开始之前，应对整个测试系统（包括测量接收机、电缆、衰减器、耦合器及软件等）按照单项测试方法的规定，通过注入一已知信号来进行检验，同时监测系统输出指示是否满足要求。

3.2.5.2 天线系数

电场测试天线的天线系数，按测试配置要求，在测试现场需重新按 QJ 2840 确定。

3.2.6 详细要求

3.2.6.1 CE101 25Hz~10kHz 电源线传导发射

本测试方法用来测量 EUT 输入电源线（包括回线）上的传导发射。

(1) 测试设备。测量接收机、电流探头、信号发生器、数据记录装置、示波器、电阻器和阻抗稳定网络。

(2) 测试方法。按图 9.2-15 布置，EUT 通电预热，使其达到稳定工作状态。将电流探头钳在一条电源线上，采用本标准通用要求中规定的带宽和最小测量时间，使测量接



图 9.2-15 CE101 测试配置图

收机在适用的频率范围内扫描，对其他每根电源线重复上述测试。

3.2.6.2 CE102 10kHz~10MHz 电源线传导发射

本测试方法用来测量 EUT 输入电源线（包括回线）上的传导发射。

(1) 测试设备。测量接收机、数据记录装置、信号发生器、衰减器（20dB）、示波器、T 形同轴连接器、阻抗稳定网络。

(2) 测试方法。保持 EUT 的基本测试配置，按图 9.2-16 测试配置图。将测试接收机接到 LISN 信号输出端口的 20dB 衰减器上。选择一条电源线，采用一般要求中规定的带宽和最小测量时间，使测量接收机在适用的频率范围内扫描。应考虑测量接收机过载的潜在可能性，当预计或碰到过载条件时应采用抑制滤波器以衰减电源频率，发射数据必须加上该滤波器的插入损耗。



图 9.2-16 CE102 测试配置图

3.2.6.3 CE106 10kHz~40GHz 天线端子传导发射

本测试方法用来测量 EUT 天线端子的传导发射。



图 9.2-17 CE106 测试配置图

(1) 测试设备。测量接收机、衰减器、抑制网络、定向耦合器、假负载、信号发生器、数据记录装置。

(2) 测试方法。

1) 发射机（发射状态）测试方法。将 EUT 调到所需的测试频率并使用测量路径进行测试，用一般要求中规定的带宽和最小测量时间，使测量接收机在适用的频率范围内扫描。按设备规范中规定对 EUT 施加相应的调制，记录基频

f_0 的功率电平和测量接收机带宽,必要时可插入基频抑制网络;扫描关心的频率范围并记录所有谐波和乱真发射电平。该电平应加上电缆损耗、衰减器及抑制网络所有修正系数。保持测试接收机在进行基频功率电平测量时使用的测量带宽,鉴别并确认乱真输出是来自 EUT 而不是测量系统的乱真响应。用信号发生器代替 EUT,保持测量路径中所有耦合器和抑制网络不变,通过测量路径确定其损耗。

2) 发射机(待发状态)和接收机测试方法。将 EUT 调到所需的工作频率并使用测量路径进行测试,采用本标准一般要求中规定的带宽和最小测量时间,使测量接收机在适用的频率范围内扫描。对按同样方法对其他频率重复上述测试。

3.2.6.4 CS101 25Hz~50kHz 电源线传导敏感度

本测试方法用来检验 EUT 承受耦合到输入电源线上信号的能力。

(1) 测试设备。信号发生器、功率放大器、示波器、耦合变压器、电容器、隔离变压器、电阻器和阻抗稳定网络。

(2) 测试方法。对 DC 或单相 AC 电源按图 9.2-18 配置图,对三相△形连接电源按图 9.2-19 配置图,对三相 Y 形连接电源(四根电源线)按图 9.2-20 配置图布置测试配置,为保护功率放大器,如果必要,可采用一个等效 EUT 的假负载和一个附加耦合变压器,以使它的感应电压等于注入变压器的感应电压,但其相位相反;如果可能,假负载应与 EUT 的功率因数相同。两相同注入变压器按图 9.2-21 配置图连接到放大器输出回路前,应测量电压以确认两电压抵消连接无误。

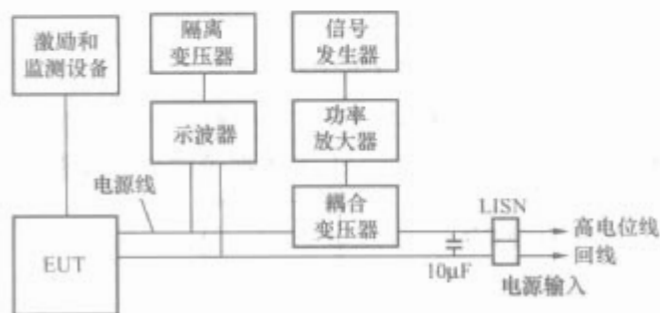


图 9.2-18 DC 或单相 AC 电源线信号注入

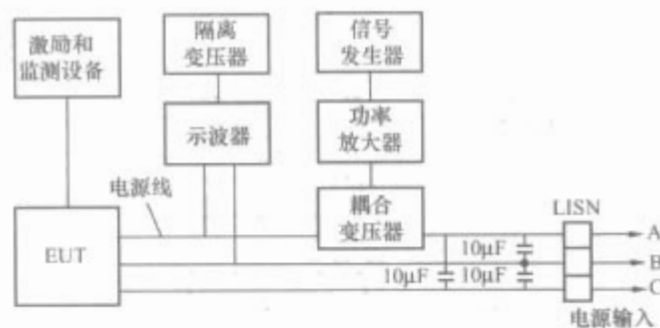


图 9.2-19 三相△形电源线信号注入

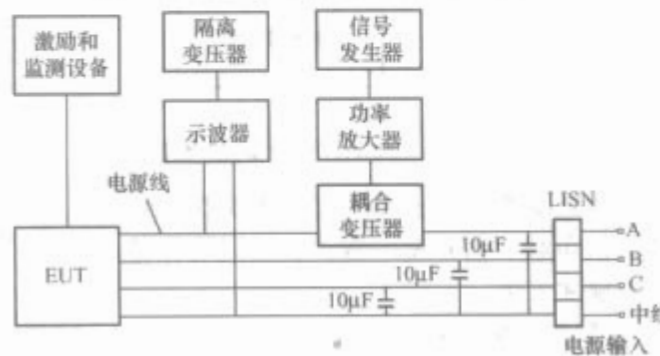


图 9.2-20 三相 Y 形电源线信号注入

1) 将信号发生器调到最低测试频率,增加信号电平,

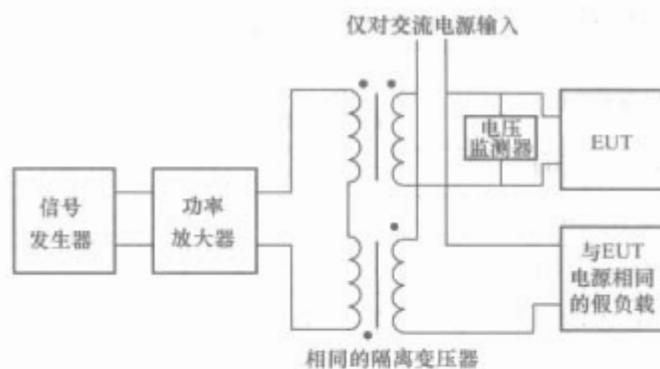


图 9.2-21 功率放大器保护

直到电源线上达到要求的电压或功率电平为止(电压限制到规定的极限电平)。

2) 保持要求的信号电平,以不大于表 9.2-18 规定的扫描率,在整个要求的频率范围内进行扫描测量。

3) 敏感度鉴定。监测 EUT 是否敏感,如果敏感现象产生,则进一步确定敏感度门限电平,对每根电源线重复测试。

3.2.6.5 CS103 15kHz~10GHz 天线端子互调传导敏感度

本测试方法用来测量通信接收机、射频调谐放大器、无线电台、雷达接收机、声纳接收机以及电子对抗装备接收机等 EUT 天线输入端不希望信号引起的互调产物。

(1) 测试设备。信号发生器、20dB 隔离器、滤波器、频率计、输出监测器、测量接收机。

(2) 测试方法。当详细规范没有规定其他测试方法时,可采用本测试方法。

1) 本测试方法所用符号规定。 f_0 为 EUT 调谐频率、 f_1 为信号发生器 1 的频率、 f_m 为产生互调产物频率,由信号发生器 2 频率确定, $\Delta f = |f_1 - f_0|$ 。

2) 使信号发生器 2 的输出为零,将信号发生器 1 调谐至 EUT 调谐频率 f_0 ,并按规定进行调制。调节其输出电平,使 EUT 产生标准参考输出电平,记下信号发生器 1 的输出电平 V_{10} 与频率 f_0 ;使信号发生器 1 的输出为零,对信号发生器 2 重复上述步骤,记下它的输出电平 V_{20} 。

3) 使信号发生器 2 的输出为零,信号发生器 1 按规定进行调制,调节其输出电平,使其等于详细规范规定的极限值电平与 2) 步所得电平 V_{10} 之和,并保持此输出电平不变,然后逐渐提高信号发生器 1 的频率,直到 EUT 没有响应为止,记下该频率 f_1 并使信号发生器保持在 f_1 ,则 $\Delta f = f_1 - f_0$ 。

4) 使信号发生器 1 的输出为零,信号发生器 2 不进行调制,将信号发生器 2 的频率调至 $f_2 = f_1 + \Delta f = f_0 + 2\Delta f$,然后将信号发生器 1 和信号发生器 2 的输出电平分别等于详细规范规定的极限值电平与 V_{10} 、 V_{20} 之和,观察互调产物。此时若 EUT 无明显响应则逐步增加两台信号发生器的输出电平,直到 EUT 出现响应为止。保持该输出电平不变,对信号发生器 2 的频率进行微调,使 EUT 响应最大,记下信号发生器 2 的频率,观察 m 阶互调产物。从 f_2 开始逐渐增加信号发生器 2 的频率,保持恒定输出电平,直到 $10f_0$ 或 10GHz (取低者),同时观察互调产物。

5) 使信号发生器 1 的输出为零,如 EUT 的响应仍然存在,则说明该产物不是互调引起的。如响应随之消失,则说明该响应是互调产物。用图 9.2-22 中测量接收机能证明互调产物是来自 EUT 或是来自信号源的谐波或测试装置。

6) 如果 5) 步检查结果说明 4) 步出现的响应是由互调引起的,则等量降低两台信号发生器输出电平,直到 EUT



图 9.2-22 CS103 通用测试布置

达到标准参考输出电平为止,此时记下两台信号发生器的输出电平 V_1 和 V_2 ,并按下式计算互调抑制电平

$$S_m = (V_1 - V_{10}) \text{ 或 } (V_2 - V_{20}) \quad (9.2-15)$$

式中: S_m 为 m 阶互调抑制电平, dB; V_1 、 V_2 为由 6) 步得到的信号发生器 1 和 2 的输出电平 (dB μ V); V_{10} 、 V_{20} 为由 2) 步得到的信号发生器 1 和 2 的输出电平, dB μ V。

7) 将信号发生器 1 和 2 的频率分别调节到 $f_1 = f_0 - \Delta f$ 与 $f_2 = f_0 - 2\Delta f$, 重复 3)、4)、5)、6) 步。

8) 为观察 m 阶互调产物, 慢慢降低信号发生器 2 的频率并保持恒定电平直至 $0.1f_0$ 或者 25Hz (取高者) 为止。

9) 用于本项测试的信号发生器应始终按照适用于 EUT 灵敏度的相同方法调制, 该方法应在 EUT 详细规范中规定, 标准参考输出电平也应在 EUT 详细规范中规定。如详细规范没有这方面的规定, 则应采用表 9.2-19 的调制方法和参考输出电平。

表 9.2-19 调制方法和参考输出

接收机类型	调制方式	参考输出
调幅接收机	信号发生器应用 400Hz 正弦波进行 30% 调制	$(S+N)/N=10\text{dB}$
单边带接收机	信号发生器不进行调制	$(S+N)/N=10\text{dB}$
调频接收机	信号发生器以 1kHz 正弦波进行频率调制, 频偏为 10kHz	调制: $(S+N)/N=10\text{dB}$ 不调制: 静噪电平为 10dB
脉冲接收机	调节调制脉冲使其频谱能量的 80% 处于接收机 3dB 带宽内	$(S+N)/N=10\text{dB}$

10) 测试中信号发生器频率可能漂移, 则需要重调每个信号发生器, 以便确保测量最大的响应。

11) 对跳频接收机, 一种可行的方法是在跳频范围内选择一个 f_0 再按上述方法配置信号源, 然后接收机按跳频来评估。

12) 对在天线组件中具有前端混频和滤波的接收机, 必须考虑辐射的影响, 为保证观察到的任何响应是由于接收机而不是由测试场上的设备造成的, 可以要求测试在屏蔽暗室内进行。

13) 三阶互调产物是接收机最普遍观察到的较重要响应, 为观察此物, f_1 和 f_2 也可在整个期望的频率范围内按 $f_0 = 2f_1 - f_2$ 关系扫描和步进。

3.2.6.6 CS104 25Hz~20GHz 天线端子无用信号抑制传导敏感度

本测试方法用来测量通信接收机、射频调谐放大器、无

线电台、雷达接收机、声纳接收机以及电子对抗装备接收机等 EUT 天线输入端无用信号引起的乱真响应。

(1) 测试设备。信号发生器、20dB 隔离器、滤波器、频率计、输出监测器和测量接收机。

(2) 测试方法。测试配置应如图 9.2-23 所示, 当详细规范没有规定其他测试方法时, 可采用本测试方法。

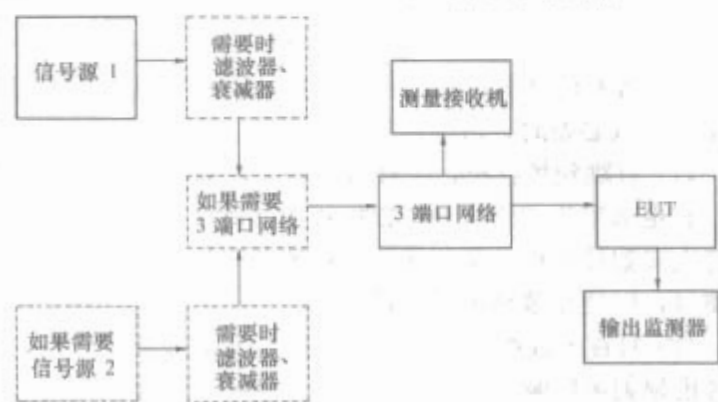


图 9.2-23 CS104 通用测试配置

1) 本测试方法所用符号。 f_0 为 EUT 调谐频率、 f_{sp} 为产生乱真响应的频率、 f_H 为 EUT 的中频、 f_L 为 EUT 本振频率。

2) 使信号发生器 2 的输出为零, 按本标准一般要求规定将信号发生器 1 调谐至 EUT 调谐频率 f_0 , 并按规定进行调制。调节其输出使 EUT 产生标准参考输出电平, 记下信号发生器 1 的输出电平 V_{10} 与频率 f_0 ; 使信号发生器 1 的输出为零, 对信号发生器 2 重复上述步骤, 记下它的输出电平 V_{20} 。

3) 接通两个信号发生器, 信号发生器 1 按要求进行调制, 信号发生器 2 不调制。

4) 将信号发生器 1 调到 2) 步得到的电平 V_{10} , 信号发生器 2 调到等于详细规范规定的极限值与 V_{20} 之和。

5) 用信号发生器 2 在所需测试频率范围内扫描检查所有响应。

6) 为确保测量的是 EUT 乱真响应, 而不是信号发生器的谐波或乱真输出, 可利用图 9.2-23 中的测量接收机, 以证明乱真响应是来自 EUT 还是来自信号源的谐波和测量装置。

7) 当得到一个真实的乱真响应时, 应降低信号发生器 2 的输出电平, 直到 EUT 重新获得标准参考输出为止, 记下信号发生器的输出电平 V , 并按下式计算乱真响应抑制电平

$$S_s = V - V_{20} \quad (9.2-16)$$

式中: S_s 为乱真响应抑制电平 (dB); V 由 7) 步得到的信号发生器输出电平 (dB μ V); V_{20} 由 2) 步得到信号发生器 2 的输出电平 (dB μ V)。

8) 如按 4) 步信号发生器 2 的输出电平, 按 5) 步扫描时, EUT 无响应, 则允许增加信号发生器 2 的输出电平, 再按 5) 步扫描, 直至 EUT 出现乱真响应为止, 再重复 7) 步以确定乱真响应抑制电平。

9) 测试频率范围如下:

放大器: 信号发生器 2 应从 $0.05f_1 \sim f_1$, 从 f_2 扫到 $20f_2$, f_1 为放大器的下限频率, f_2 是上限截止频率。

接收机: 信号发生器应按表 9.2-20 在整个频率范围内扫描, 在选择性曲线上两个 80dB 点之间的频率范围内可免除此项测试, 下限频率应该是从 A 栏得到的最低值, 上限频率应该是从 B 栏得到的最高值。当测试多级变频接收机时, 表 9.2-20 中 A 栏的中频应是最低中频, B 栏中的中频和本振频率是与接收机有关的最高频率。具有波导输入的接

收机,要求的频率范围是从 $0.8f_c$ 到从 B 栏中获得的较高频率 (f_c 是波导截止频率)。

表 9.2-20 信号发生器扫频范围

A 栏	B 栏
中频/5	5 倍本振频率+中频
$0.05f_0$	$20f_0$

10) 所有信号源都发出相当数量的谐波和其他乱真信号能量,所以必要时,可采用滤波器滤除。

11) 对跳频接收机,一种可行的方法就是采用单信号源法。它更适用于搜索信号加以捕捉的接收机。双信号源法更适合大多数接收机,某些接收机可能要求采用两种方法来对其测量,以便完整地说明其特性。

12) 对在天线组件中具有前端混频和滤波的接收机,必须考虑辐射的影响,为保证观察到的任何响应是由于接收机而不是由测试场上的设备造成的,可以要求测试在屏蔽暗室内进行。

3.2.6.7 CS105 25Hz~20GHz 天线端子交调传导敏感度

本测试方法用来测量通信接收机、射频调谐放大器、无线电台、雷达接收机、声纳接收机以及电子对抗装备接收机等 EUT 天线输入端不希望信号引起的交调产物。

(1) 测试设备。信号发生器、20dB 隔离的三端网络、滤波器、频率计、输出监测器和测量接收机。

(2) 测试方法。测试配置应如图 9.2-24 所示,当详细规范没有规定其他测试方法时,可采用本测试方法。



图 9.2-24 CS105 测试配置

1) 本测试方法所用符号规定。 f_0 为 EUT 调谐频率, f_1 为信号发生器 1 的频率, f_m 为产生交调产物频率,由信号发生器 2 频率确定, f_H 为 EUT 中频。

2) 使信号发生器 2 的输出为零,按本标准一般要求规定将信号发生器 1 调谐至 EUT 调谐频率 f_0 ,并按规定进行调制。调节其输出电平,使 EUT 产生标准参考输出电平,记下信号发生器 1 的输出电平 V_{10} 与频率 f_0 ;使信号发生器 1 的输出为零,对信号发生器 2 重复上述步骤,记下它的输出电平 V_{20} 。

3) 接通两个信号发生器,信号发生器 2 按规定进行调制,信号发生器 1 不调制。调节信号发生器 1 的输出电平,使其比 2) 步所得电平 V_{10} 高 10dB。

4) 把信号发生器 2 的输出电平调到等于详细规范规定的极限值电平与 2) 步所得电平 V_{20} 之和。

5) 从 EUT 响应曲线(或选择性曲线)上电平等于 4) 步所得电平的频率开始,调节信号发生器 2 的频率直到 $f_0 \pm f_H$ 为止;同时监测 EUT 输出,观察互调产物。

6) 当找到响应时,去掉信号发生器 2 的调制,如响应消失,则是由交调产生的。用图 9.2-24 中测量接收机也能证明互调产物是来自 EUT 或是来自信号源的谐波和测量装置。再降低信号发生器 2 的输电平,直到 EUT 恢复产生标准参考输出为止。记下信号发生器 2 的电平和频率,该电子和 2) 步电平 V_{20} 之差,即为交调抑制电平。

7) 在测试中信号发生器频率可能漂移,则需要重调每个信号发生器,以便确保测量最大的响应。

8) 对跳频接收机,一种可行的方法就是在跳频范围内选择一个 f_0 ,再按上述方法配置信号源,然后接收机按跳频来评估。

9) 对在天线组件中具有前端混频和滤波的接收机,必须考虑辐射的影响,为保证观察任何响应是由于接收机而不是由测试场上的设备造成的,可以要求测试在屏蔽暗室内进行。

3.2.6.8 CS106 电源线尖峰信号传导敏感度

在设备、分系统所有不接地的交流和直流输入电源线上测试设备,分系统对电源线上注入尖峰信号的敏感度。

(1) 测试设备。尖峰信号发生器、 $10\mu\text{F}$ 穿心电容器、100MHz 带宽示波器、抑制滤波器(对电源频率至少应抑制 40dB)。

(2) 测试方法。对交流和直流供电的 EUT 按图 9.2-25 进行串联测试配置。

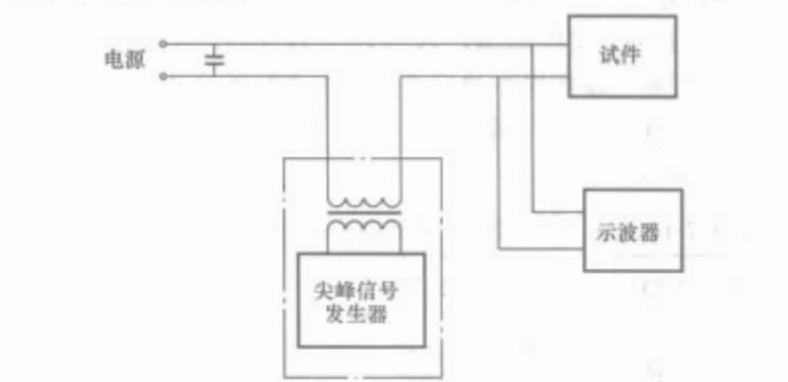


图 9.2-25 CS106 测试配置

1) 缓慢增加尖峰信号发生器输出电平以提供规定的尖峰电压,但不超过预先校准尖峰信号发生器的输出电平。

2) 调整同步和触发,使尖峰信号处于试样将产生最大敏感度的特定位置上。

3) 将正的、负的,单个的及重复的(6~10pps)尖峰信号加到试样的不接地输入端,注入时间不超过 30min。尖峰信号应与电源同步,并调在每隔 90° 的各个相位上,其注入时间不小于 5min。此外,还要求调节尖峰信号触发相位,使其分别在电源频率的 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内出现。改变尖峰信号同步频率(从 50~1000Hz),并注意它对设备敏感度的影响,对使用数字电路的设备,触发尖峰信号应在逻辑电路产生的任何开门时间内和产生的任何脉冲时间内出现。

4) 如果发现试样对尖峰信号敏感,则应测定和记录它的门限电平、重复频率、在交流波形上的相位位置以及在数字门电路上出现的时间。

5) 必要时,在电源线与示波器之间插入抑制滤波器。

3.2.6.9 CS109 50Hz~100kHz 壳体电流传导敏感度

本测试方法用来检验 EUT 承受壳体电流的能力。

(1) 测试设备。信号发生器、示波器或电压表、 0.5Ω 电阻器和隔离变压器。

(2) 测试方法。按图 9.2-26 所示配置 EUT 和测试设备(包括信号发生器、测试电流监测设备以及使 EUT 工作和

监测 EUT 性能降低的设备), 确保测试配置单点接地。



图 9.2-26 CS109 测试配置

1) 使用隔离变压器隔离 EUT 和所有测试设备的交流电源, 对直流电源供电的 EUT, 隔离变压器不适用。

2) 将 EUT 和测试设备放在非导电平面上, 断开所有输入 EUT 电源线的安全接地线。

3) 在 EUT 上测试点的选择取决于 EUT 类型和最终装配或安装方法, 测试点应选在跨接于穿过 EUT 所有面对角线的端点上。

4) 将信号发生器和电阻器接到所选择的一组测试点上。

5) 将信号发生器调到要求的最低频率, 再将其调到要求的电平, 通过测量电阻器两端电压监测其电流。

6) 在按照适用极限值保持电流电平的同时,按本标准一般要求在 50Hz~100kHz 频率范围内进行扫描,并监测 EUT 是否敏感。

7) 如 EUT 出现敏感, 则要确定敏感度门限电平 (在该电平下, EUT 刚好不出现不希望有的响应), 并确信该电平不满足要求。

3.2.6.10 CS114 10kHz~400MHz 电缆束注入传导敏感度

本测试方法用来检验 EUT 承受耦合到与 EUT 有关电缆上射频信号的能力。

(1) 测试设备。测量接收机、电流注入探头、电流探头、校准装置、定向耦合器、信号发生器、绘图仪、衰减器、 50Ω 同轴负载、功率放大器和阻抗稳定网络。

(2) 按图 9.2-27 测试配置对 EUT 进行测试。将注入和监测探头钳在与 EUT 连接器连接的电缆束上, 将监测探头置于距 EUT 连接器 50mm 处, 如果连接器和基座壳总长超过 50mm, 则监测探头应尽量靠近连接器的基座壳, 置电流注入探头距监测探头 50mm。

1) 将信号发生器调到 10kHz, 不调制; 增加施加的信号电平, 直到测量接收机 A 指示出 GJB151A 中规定的电流电平流过校准装置的中心导体为止; 记下测量接收机 B 上指示的馈入注入探头的人射功率; 在 10kHz~400MHz 频率范围内进行扫描, 并记录下保持 GJB151A—1997 极限值电平所需要的人射功率。

2) 对包括有完整电源电缆（高位线和回线）EUT 上的每个连接器端接的每个电缆束要按下列步骤进行测试。对不包括电源回线的电源电缆也要按下列步骤进行测试。

使 EUT 通电预热达到稳定工作状态。

电缆环路阻抗特性确定：信号发生器调到 10kHz，不加调制；施加约 1mW 功率电平信号到注入探头，并分别记下

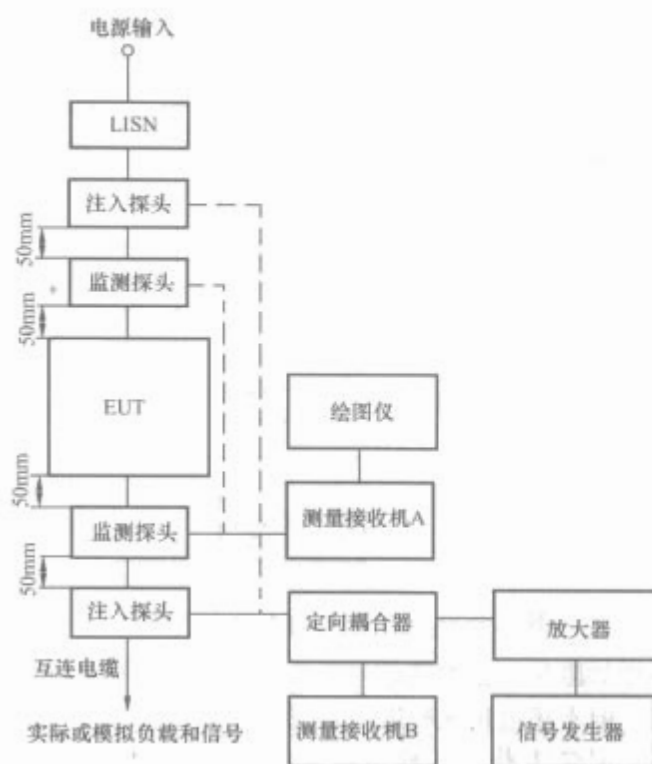


图 9.2-27 CS114 测试配置

测量接收机 B 指示的功率电平（考虑注入探头插入损耗折算到注入探头输出界面）和测量接收机 A 指示的感应电流电平；在 10kHz~400MHz 频率范围内进行扫描，并记录施加的功率电平和感应电流电平；将测量结果归一化到安培每瓦 (A/W)。

敏感度评估：将信号发生器调到 10kHz，用 1kHz 占空比为 50% 脉冲进行脉冲调制；将校准确定的人射功率电平馈入注入探头，同时监测感应电流；在 10kHz~400MHz 频率范围内，按本标准一般要求进行扫描测试，同时使人射功率保持在校准电平或 GJB151A—1997 中最大电流电平上（两者选电平低者）；监测 EUT 是否性能降低，如 EUT 出现敏感，则要确定敏感度门限电平（在该电平下，EUT 刚好不出现不希望响应），并确定该电平不满足 GJB151A 要求。

3.2.6.11 CS116 10kHz~100MHz 电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感度

本测试方法用来检验 EUT 承受耦合到与 EUT 有关电缆和电源线上的阻尼正弦瞬变信号的能力。

(1) 测试设备。阻尼正弦瞬变信号发生器、电流注入探头、记忆示波器、校准装置、电流探头、波形记录器、衰减器、测量接收机、功率放大器、同轴负载、信号发生器、定向耦合器、阻抗稳定网络。

(2) 测试方法。

1) 波形检验。将阻尼正弦信号发生器的频率调到10kHz,按GJB151A—1997要求的电平调整阻尼正弦瞬变信号的幅度,对0.01、0.1、1、10、30、100MHz频率和谐振频率进行校验。

2) 对包括有完整电源电缆（高位线和回线）EUT 上每个连接器端接的每个电缆束，按图 9.2-28 的典型配置进行测试。此外，对每根单独的电源线也要按下列步骤进行测试。将 EUT 通电预热，使其达到稳定工作状态进行测试，并确定环路阻抗特性和对敏感度评估。

环路阻抗特性确定：标出最大和最小阻抗出现时的谐振频率。

敏感度评估：当阻尼正弦瞬变信号源连接好但未被触发时，EUT 不应受影响；将阻尼正弦瞬变信号发生器调到测试频率；按顺序对 EUT 每根电缆或电源线施加测试信号。

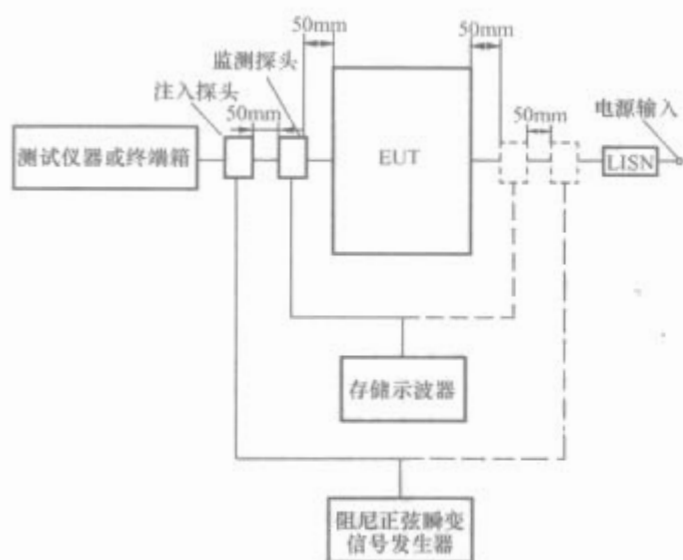


图 9.2-28 CS116 典型测试配置

缓慢地增加阻尼正弦瞬变信号发生器的输出电平以提供规定的电流，但不超过预先校准的阻尼正弦瞬变信号发生器的输出电平，记录下获得的峰值电流；监测 EUT 是否性能降低，确定敏感度门限电平。

3.2.6.12 RE101 25Hz~100kHz 磁场辐射发射

本测试方法可检验来自 EUT 及其有关电线、电缆的磁场发射是否超过要求。

(1) 测试设备。测量接收机、数据记录装置、环状传感器和阻抗稳定网络。

(2) 测试方法。将环状传感器位于离 EUT 面或电缆 70mm 处，如图 9.2-29 所示，并使环状传感器的平面平行于 EUT 面和平行于电缆的轴线；采用规定的带宽和最小测量时间，使测量接收机在整个适用的频率范围内扫描，找出最大辐射的频率点；在沿着 EUT 一个面或沿着电缆移动环状传感器（保持 70mm 距离）的同时，监测测量接收机的输出，在距最大辐射点 70mm 距离处，调整环状传感器平面的方向，使测试接收机给出一个最大读数并记下此读数；将环状传感器移开并使其位于距 EUT 面或电缆 500mm 处测量并记录。

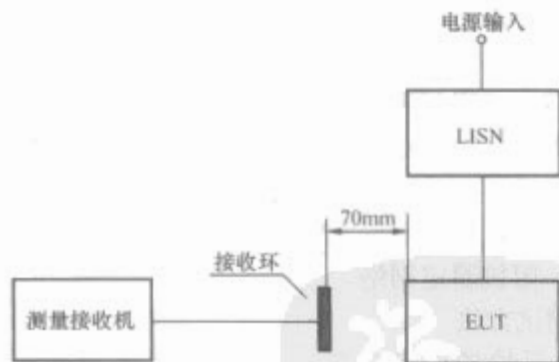


图 9.2-29 RE101 磁场辐射发生典型配置

3.2.6.13 RE102 10kHz~18GHz 电场辐射发射

本测试方法可检验来自 EUT 及其有关电线、电缆的电场发射是否超过规定的要求。

(1) 测试设备。测量接收机、数据记录装置、10kHz~30MHz 拉杆天线、30~200MHz 双锥天线、200MHz~18GHz 双脊喇叭天线、信号发生器和短棒辐射器等。

(2) 测试方法。确保 EUT 产生最大辐射发射的面朝向测量天线，RE102 基本测试布置如图 9.2-30 所示。

1) 天线地网的搭接。对屏蔽室内测量，使用一个与地网同宽的实心金属带将拉杆天线地网搭接接到接地平板上，地网与接地平板之间最大直流搭接电阻为 2.5mΩ。使用金属

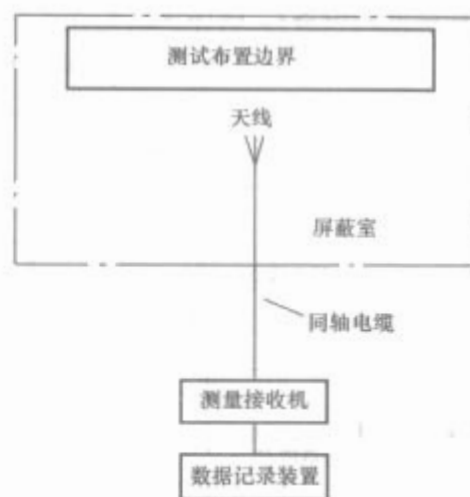


图 9.2-30 RE102 基本测试布置

接地板的测试工作台，搭接该地网到金属接地平板上。否则将地网搭接接到地面接地平板上。对在屏蔽室外的测量，要将地网搭接接到大地接地点上。

2) 对所有配置，天线应距测试配置边界的前缘 1m；对大型 EUT 在屏蔽室地板平面上的不固定安装，将 1040mm 拉杆天线匹配网络搭接和安装在接地平板上，不用地网。

3) 放置天线位置数量，取决于 EUT 测试边界尺寸和 EUT 包括的分机数量和天线的方向性图。对小于 3m 测试边界边缘的布置，要求天线放置一个位置且天线应位于相应边界边缘的中垂线上；对大于 3m 测试边界边缘的布置，按图 9.2-31 所示的间隔采用多个天线位置（用从一个边缘到另一个边缘的距离除以 3 并将其上进为整数，就是天线位置数）；对从 200MHz~1GHz 的测试，用下列准则确定具体的天线位置：要以足够数量的位置放置天线，以使每个 EUT 壳体的整个宽度和与 EUT 壳体端接的电线电缆 350mm 暴露在 3dB 波束宽度范围内；对高于 1GHz 频率的测试，要以足够数量的位置放置天线，以使每个 EUT 壳体的整个宽度和与 EUT 壳体端接的电线电缆 70mm 暴露在 3dB 波束宽度范围内。

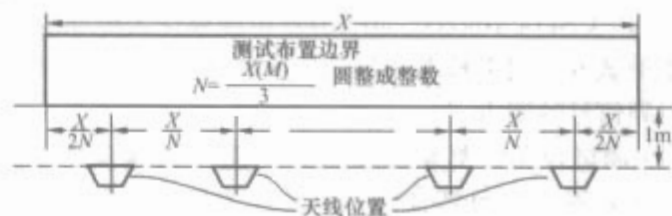


图 9.2-31 多测试点的天线位置确定

4) 检查电磁环境电平和路径，施加一个校准信号到天线连接点处的同轴电缆上，其电平比 GJB 151A—1997 极限值减去天线系数后低 6dB；按照正常数据扫描的方法使测量接收机进行扫描，检查数据记录装置的指示电平是否在注入信号电平的±3dB 范围内。

5) 测量路径检查，确定 EUT 及其有关电缆的辐射发射。采用规定的带宽和最小测量时间，使测量接收机在整个适用的频率范围内扫描，对 30MHz 以上的频率，天线应取水平极化和垂直极化两个方向，每个天线位置进行测试。

3.2.6.14 RE103 10kHz~40GHz 天线谐波和乱真输出辐射发射

本测试方法用来检验发射机从天线辐射的谐波和乱真发射是否超过要求。

(1) 测试方法。测量必需在远场条件下进行，收、发天线均应架设适当高，使地面反射效应可以忽略。如图 9.2-32 所示，在进行测试之前必需用下述公式计算远场距离。



图 9.2-32 RE103 测试配置

当发射机频率不大于 1.24GHz 时,应采用下列两公式计算并选取较大者

$$R = 2D^2/\lambda, \text{ 或 } R = 3\lambda \quad (9.2-17a)$$

当发射机频率大于 1.24GHz 时,应计算如下

$$\text{当 } 2.5D < d \text{ 时, } R = 2D^2/\lambda$$

$$\text{当 } 2.5D \geq d \text{ 时, } R = (D+d)^2/\lambda \quad (9.2-17b)$$

式中: R 为发射天线与接收天线之间的距离, m; D 为发射天线的最大几何尺寸, m; d 为接收天线的最大几何尺寸, m; λ 为发射机频率对应的波长, m。

(2) EUT 测试。

1) EUT 通电预热,使其达到稳定工作状态。

2) 将 EUT 调谐到所需的工作频率 f_0 , 并使用测量路径完成下列步骤。

3) 将测试设备调谐到 EUT 的工作频率 f_0 , 并将指示值调谐到最大。

4) 在键控发射机的同时,使用功率监测器测量已调制的发射机输出功率 P , 并将该功率电平的单位转换成以 1W 为参考的分贝值 (dBW), 通过将 EUT 天线增益和该功率电平相加计算出有效辐射功率 (ERP), 并将该值作为测试的参考值。

5) 键控发射机到所希望的调制,在发射频率点将测量接收机调谐到最大输出指示值。如果两天线之一或两者具有方向性,则要调整天线的仰角和方位使指示值最大。测试场地之间借助无线电话通信联络将方便测试。记录接收机最大读数和宽带,根据测量接收机读数,使用下式计算发射机有效辐射功率

$$ERP = V + 20\lg R + AF - 135 \quad (9.2-18)$$

式中: ERP 为发射机有效辐射功率, dBW; V 为测量接收机上的读数, dB μ V; R 为发射天线和接收天线之间距, m; AF 为接收天线系数, dB/m。

将计算出的参考 ERP 电平与 4) 步得到的测试电平比较,偏差应在 ± 3 dB 以内。如果两电平差值超过 ± 3 dB, 则要检查测试配置在测试距离、幅度校准、发射机功率监测、频率调谐或漂移以及天线视轴是否对准方面的误差。如果两电平差值在 ± 3 dB 范围内,则 ERP 将成为用来进行谐波和乱真发射幅度比较的基准,从而确定是否满足标准限值要求。

6) 接上抑制滤波器网络并调谐到 f_0 时,使测量接收机在整个测试频率范围内扫描,以寻找谐波和乱真发射。对每个谐波和乱真发射频率,必需调整测量系统天线的仰角和方位,以确保接收到最大电平。测试过程中始终采用在测量基频时测量接收机所用带宽。

7) 证明乱真输出是来自 EUT 而并非是测量系统或测试场地环境的乱真响应。

8) 考虑所有电缆损耗、放大器增益、滤波器损耗以及衰减器等修正系数,计算每个乱真响应输出的 ERP 。

3.2.6.15 RS10 125Hz~100kHz 磁场辐射敏感度

本测试方法用来检验 EUT 承受磁场辐射的能力。

(1) 测试设备。信号源、辐射环 (直径 120mm、匝数 20、 $\phi 1.25$ mm 漆包线,在距环平面 50mm 的距离点产生的磁通密度为 9.5×10^7 pT/A)、环传感器 (直径 40mm、匝数 51)、测量接收机或窄带电压表、电流探头、阻抗稳定网络。

(2) 测试方法。按图 9.2-33 典型的测试配置测试。



图 9.2-33 RS101 典型的测试配置

1) 将辐射环置于离 EUT 的一个面 50mm 处,环的平面应平行于 EUT 表面;给辐射环施加足够的电流,以产生至少大于 GJB 151A—1997 适用极限值 10dB 的磁场强度,但不超过 15A (183dBpT),在 GJB 151A—1997 规定的频率范围内进行扫描。

2) 如 EUT 出现敏感,则在那些存在最大敏感指示的频率点上每倍频程选择不少于三个测试频率。

3) 改变环的位置,使环依次对准 EUT 每个面上 300mm \times 300mm 区域和每个接口连接器,对所确定的每个频率点施加一个能产生 GJB 151A—1997 适用极限值电平的电流到辐射环上。在保持环面与 EUT 表面、电缆或电连接器间距 50mm 的同时,移动辐射环,确定敏感情况是否出现。

3.2.6.16 RS103 10kHz~40GHz 电场辐射敏感度

本测试方法用来检验 EUT 和有关电缆承受辐射电场的能力。

(1) 测试设备。信号发生器、功率放大器、接收天线、发射天线、电场传感器、测量接收机、功率计、定向耦合器、衰减器、数据记录装置和阻抗稳定网络。

(2) 测试方法。10kHz~1GHz 要求使用电场传感器,高于 1GHz 可以使用电场传感器也可以使用接收天线进行校准,按图 9.2-34 布置测试配置。

1) 电场传感器实时监测法。将信号源调到 1kHz, 占空

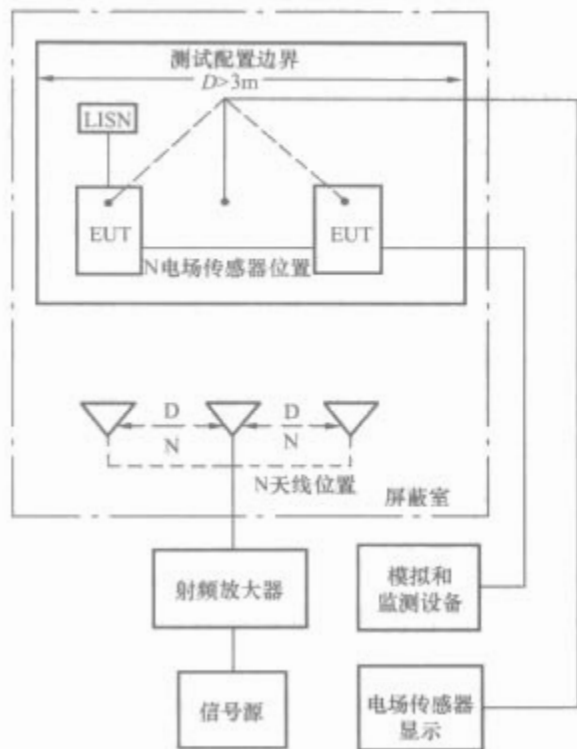


图 9.2-34 RS103 测试布置 (N 个位置 $D > 3m$)

比 50% 脉冲调制，采用适当的放大器和发射天线，在测试起始频率点产生一电场，逐渐增加注入的功率电平，直到电场传感器的显示达到 GJB 151A—1997 表示的相应极限为止；按一般要求规定的速率和驻留时间在要求的频率范围内进行扫描，保持场强电平符合适用的极限值，监测 EUT 性能是否敏感。

2) 接收天线预校准法。将信号源调到 1kHz，占空比 50% 脉冲调制，采用适当的放大器和发射天线，在测试起始频率点产生一电场，逐渐增加输入的功率电平，直到它符合预校准期间记录的相应电平；在保证将放大器的输入功率调整到所采集预校准数据的同时，按本标准一般要求规定的速率和驻留时间在要求的频率范围内进行扫描，并不断监测 EUT 是否敏感。

3) 发射天线的位置，天线应放在距测试配置边界 1m 远处。

200MHz 以下，测试配置边界小于或等于 3m，天线在测试配置边界边缘的中心线上，该边界包括 EUT 所有分机壳体及本标准特殊要求中规定 2m 暴露的电源线和互连线，若在平台实际安装中互连线小于 2m，也可接受。测试配置边界大于 3m，使用多个天线位置，天线的位置数 N 应通过从一个边缘到另一个边缘的边界距离（单位：m）除以 3 并上取整数来确定。

200MHz 以上频率，需要较多天线位置数，应如下确定天线位置数 N 。对 200MHz~1GHz 的测试，应以足够数量的位置放置天线，以使每个 EUT 分机壳体的整个宽度和靠近 EUT 端接的 350mm 电缆和电线在天线 3dB 波束宽度以内；对大于或等于 1GHz 的测试，应以足够数量的位置放置天线，以使每个 EUT 分机壳体的整个宽度和靠近 EUT 端接 70mm 的电缆和电线在天线 3dB 波束宽度以内。

3.2.6.17 RS105 瞬变电磁场辐射敏感度

本测试方法用来检验 EUT 壳体承受瞬变电磁场的能力。

(1) 测试设备。GTEM 小室、平行板、横电磁波小室或等效设备，高压脉冲转接器、瞬变单脉冲发生器、存储示波器、保护装置、高压探头、电场宽带时域探头、或 B 传感器和积分器、或 D 传感器和积分器、阻抗稳定网络。

(2) EUT 测试

1) 校准。将电场宽带时域探头置于 GTEM 或平行板、横电磁波小室测试空间中间，探头连接到存储示波器上；将高压探头接至 GTEM 高压脉冲转接器中，宽带时域探头接到存储示波器上。RS105 采用 GTEM 或平行板测试配置如图 9.2-35 和图 9.2-36 所示。在不超过 GTEM 可用空间情况下，将 EUT 壳体放在 GTEM 底板或接地平板上，GTEM 芯板与底板间距至少是 EUT 的三倍。

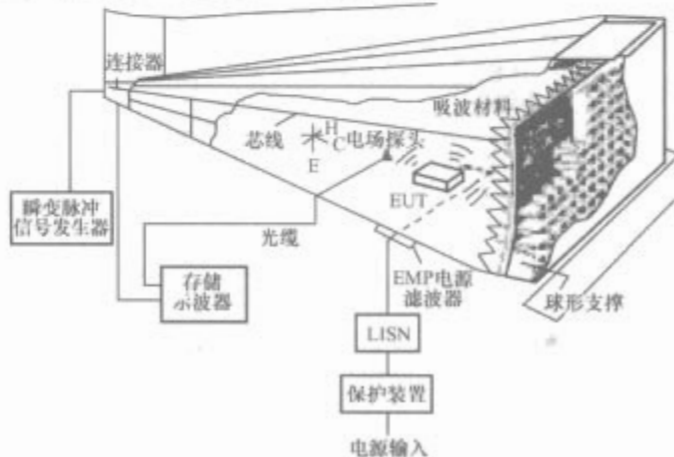


图 9.2-35 RS105 采用 GTEM 测试配置

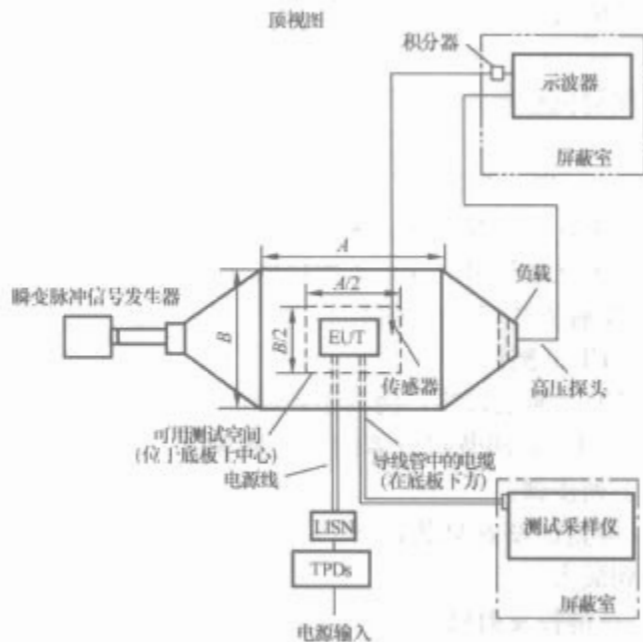


图 9.2-36 RS105 采用平行板测试配置

2) 产生一个单脉冲。注意：产生的高压可能是致命的，监测此脉冲，确保该脉冲满足规定的上升时间、峰值幅度和衰减指标。

3) 可能时，应对 EUT 三个正交方向进行测试。

4) 按规定的波形，从要求的 50% 峰值电平起施加一个脉冲。缓慢增加脉冲的幅度直到达到要求的电平为止，以不大于每分钟一个脉冲的速率施加要求数量的脉冲。

5) 使用校准探头和存储示波器监测施加的脉冲。

6) 在施加每个脉冲期间和之后监测 EUT，确定 EUT 是否敏感。

3.3 民用船舶设备电磁兼容性测试要求

3.3.1 一般要求

不同类型的电气电子设备应进行表 9.2-21 规定的电磁兼容性试验项目（以下统称试验），并达到要求的结果，以确保其在实际运行中的电磁兼容性。由于不同类型的电气电子设备有各自的特点，故要求进行的电磁兼容性试验项目也就不同。

表 9.2-21 不同类型的电气电子设备应进行的电磁兼容性试验项目

试验项目 设备	骚扰测量		抗扰度试验					
	传导骚扰	外壳端口 辐射骚扰	静电放电 ^[1]	射频电磁 场辐射 ^[2]	电快速瞬 变脉冲群	浪 涌	低频传导 ^[3]	射频场感应的 传导骚扰
同步电动机	✓	✓	—	—	—	—	—	—
直流电动机	✓	✓	—	—	—	—	—	—
电子自动电压校正器及其附属设备	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
无电子元件的断路器、接触器	—	—	—	—	—	—	✓	—
继电器控制的控制设备	—	—	—	—	—	✓	—	—
计算机及其外围设备	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
可携通信和航行设备	—	✓	✓	✓	—	—	—	—
防护或暴露通信和航行设备	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
潜水通信和航行设备	✓	—	—	—	✓	✓	✓	✓
上列以外的其他电气电子设备	视具体情况而定							
说明	“✓”表示需做项目，“—”表示不需做项目							

注 [1] 试验仪在操作人员正常情况下可能触及的点和表面上进行。
[2] 仅适用于安装在处于无线电发信机直接辐射下的设备。
[3] 不适用于仅由蓄电池供电的设备。

3.3.2 详细要求

3.3.2.1 传导骚扰测量

测量设备所产生并出现在其供电端子的任何信号，这些信号能够在船舶供电系统中传导，从而可能骚扰其他设备。

(1) 试验样品应按本项试验的规定，进行其供电端子频率范围 10kHz~30MHz 的射频电压测量。

(2) 应以符合 CISPR16-1 出版物规定的准峰值测量接收机进行测量。并使用符合 CISPR16-1 出版物规定的人工供电网络，以能对试验样品端子之间提供一规定的高频阻抗并能将试验电路与电源中无用无线电频率信号隔开。测量接收机的带宽：10kHz~150kHz 应为 200Hz，150kHz~30MHz 应为 9kHz。

(3) 试验样品的交流与直流端子以及与人工供电网络之间的电源输入电缆应为屏蔽电缆。如果试验样品由 1 个以上的各自交流和/或直流电源端子的组件组成，则其相同额定电压的电源端子可以并联连接至人工电源网络上。

(4) 应将所有测量设备和试验样品都安装并连接于接地平板上进行测量。也可不设接地平板，而以试验样品的金属框架或其金属本体作为参考接地。

(5) 频率范围为 10kHz~30MHz 试验样品供电端子射频电压的测量结果应不超出限值，表 9.2-22 按不同频率段列出了这些限值。

表 9.2-22 传导骚扰射频端子电压限值

位置或设备	频率范围	限 值
驾驶室和甲板区域 通信和航行设备	10~150kHz	96~50dB μ V
	150~350kHz	60~50dB μ V
	350kHz~30MHz	50dB μ V
一般配电区域	10~150kHz	120~69dB μ V
	150~500kHz	79dB μ V
	500kHz~30MHz	73dB μ V

3.3.2.2 外壳端口辐射骚扰测量

测量设备辐射（不通过天线的辐射）的任何信号，这些信号可能骚扰其他设备。

(1) 试验样品应按本项试验的规定，进行离开其外壳端口 3m 处频率范围为 150kHz~2GHz 的磁场强度或电场强度测量。

(2) 准峰值测量接收机进行测量。其测量带宽：250kHz~30MHz 及 156~165MHz，应为 9kHz；30~156MHz、165MHz~2GHz 应为 120kHz。

(3) 在频率范围为 150kHz~30MHz，应测量其磁场强度。对天线的校正系数中应包括由磁场强度换算至等效的电场强度的系数+51.5dB 在内。频率范围为 30MHz 以上时，应测量其电场强度。

(4) 试验场所应符合 CISPR16-1 出版物的有关要求。应有一金属接地平板，其面积应允许有 3m 的测量距离。

(5) 应将试验样品连同其互联电缆一同组装起来，安装在正常的工作平面上。

(6) 测量天线与试验样品之间的距离应为 3m，天线中心的高度应离接地平板 1.5m 及以上。对电场强度的测量天线，还应能调节其高度、旋转以及还能围绕试验样品旋转或者旋转试验样品，以能确定最大电场强度。

(7) 结果。频率范围为 150kHz~2GHz 试验样品外壳端口 3m 处电场强度（测得的磁场强度应换算成电场强度）的测量结果应不超过限值，表 9.2-23 按不同频段列出了这些限值。

表 9.2-23 外端口辐射骚扰限值

位置或设备	频率范围	限 值
驾驶室和甲板区域 通信和航行设备	150~300kHz	80~52dB μ V/m
	300kHz~30MHz	52~34dB μ V/m
	30MHz~2GHz	54dB μ V/m
	其中：156~165MHz	24dB μ V/m
一般配电区域	150kHz~30MHz	80~50dB μ V/m
	30~100MHz	60~54dB μ V/m
	100MHz~2GHz	54dB μ V/m
	其中：156~165MHz	24dB μ V/m

3.3.2.3 静电放电抗扰度试验

模拟当人触及设备可能出现的静电放电效应。

(1) 试验要求。试验电压：接触放电 6kV，空气放电 8kV；两次放电之间时间间隔： $\geq 1s$ ；放电参数：330 Ω /150pF；脉冲数量：每一极性 10 个。

(2) 程序。

1) 将试验样品安装在金属接地平板上，但应与其绝缘，该平板应足够大以使在试验样品周围有 0.5m 空间。用符合 IEC61000-4-2 出版物有关规定的静电放电发生器仅对操作人员在正常使用中可能接触的那些点和表面放电，在试验中应保持静电放电发生器垂直于被试表面。在预选的各点上，各施加每一极性 10 次放电，相邻两次放电之间时间间隔至少为 1s。

接触放电适用于导电表面，空气放电仅适用于绝缘表面。

2) 为了模拟放在或安装在试验样品附近物件的放电效应，每一极性 10 次接触放电施加于接地平板上距试验样品每一边 0.1m 处。另外再加 10 次放电施加于与接地平板垂直、平行于并距试验样品 0.1m、面积为 0.5m \times 0.5m 耦合板的每一边缘中部。应使耦合板处于不同位置重复进行以上放电试验，以能顾及到试验样品的 4 个表面。试验应符合 GB/T 17626.2—2006 的相关规定。

3.3.2.4 射频电磁场辐射抗扰度试验

模拟接近于设备的工作频率在 80MHz 以上的无线电发信机辐射的电磁场效应。

(1) 试验要求。频率范围：80MHz \sim 2GHz；调制频率：1000Hz 或者 400Hz（适用于通信和航行设备及当试验样品输入信号的调制频率是 1000Hz 时）；调制深度：80%；场强：10V/m；扫描速率： $\leq 1.5 \times 10^{-3}$ dec/s（或 1%/3s）。

(2) 程序。将试验样品安放在大小适当的屏蔽室或无电波暗室内，应使试验样品处于均匀磁场的位置上，并用非金属基座将其与地板绝缘起来。试验中使用的信号发射天线应能面向试验样品 4 个面的每个面。试验过程中试验样品应连续工作，包括其每一组件之间的数据传送在内。应以足够低的速率在规定的频率范围内扫描，以能发现试验样品的任何故障。对每一敏感的频率应单独进行分析。试验应符合 GB/T 17626.3—2006 的相关规定。

3.3.2.5 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

模拟设备改变电气接触产生电弧而引起的低能量骚扰。

(1) 试验要求。单脉冲上升时间：5ns（10% \sim 90%之间值）；单脉冲宽度：50ns（50%值）；电压（峰值）：电源线为 2kV（线/地），控制和信号线为 1kV（线/地）；脉冲重复率：1kV 时 5kHz，2kV 时 2.5kHz；脉冲群持续时间：15ms；脉冲群周期：300ms。

(2) 程序。试验信号应采用耦合方法施加至试验样品的 AC 和 DC 电源线和控制/信号线上。所有连接电缆的形式应符合制造厂文件的规定。每一极性试验时间为 5min。试验应符合 GB/T 17626.4 的相关规定。

3.3.2.6 浪涌抗扰度试验

模拟例如开、关大功率感性负载所产生的高能量骚扰。

(1) 试验要求。脉冲上升时间：1.2 μs （10% \sim 90%之间值）；脉冲宽度：50 μs （50%值）；电压（峰值）：线/地为 1kV，线/线为 0.51V；重复频率：1 脉冲/min；脉冲数量：每极性 5 个。

(2) 程序。采用组合波信号发生器和耦合/去耦网络进行试验。试验应符合 GB/T 17626.5—1999 的相关规定。

3.3.2.7 低频传导抗扰度试验

试验图如图 9.2-37 所示，模拟交流电源谐波和直流电源交变脉动的供电电源效应。

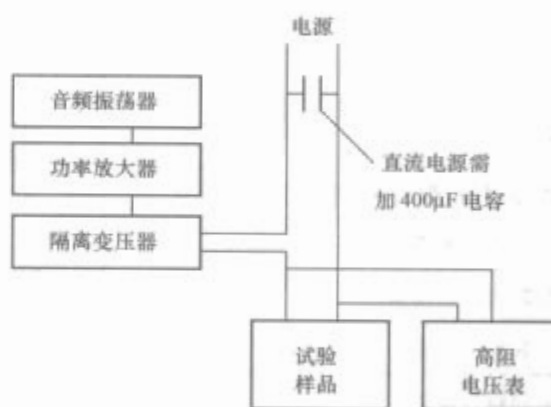


图 9.2-37 低频传导抗扰度试验图

(1) 试验要求。

1) 交流供电设备试验电压值（有效值）。电源频率的 15 次谐波及以下：10% U_n ；电源频率的 15 次谐波 \sim 100 次谐波：从 10% U_n 下降到 1% U_n ；电源频率的 100 次谐波 \sim 200 次谐波：1% U_n 。

2) 直流供电设备试验电压值（正弦有效值）。试验电压（有效值）：10% U_n ；频率范围：50Hz \sim 10kHz。

(2) 程序。交流或直流供电的试验样品典型试验装置如图 9.2-37 所示。将低频骚扰信号叠加在试验样品的供电线上且应在规定的频率范围内以足够低的变化率扫描，以能发现试验样品的任何故障。

3.3.2.8 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验

模拟由于开关电源、发动机点火、回声测深仪和无线电发信机工作，而在设备电源线、信号和控制线上感应产生频率低于 80MHz 的骚扰效应。

(1) 试验要求。

1) 频率范围：10kHz \sim 80MHz；电压（有效值）：3V；调制频率：1000Hz 或者 400Hz（适用于通信和航行设备及当试验样品输入信号的调制频率是 1000Hz 时）；调制深度：80%；频率扫描速率：1.5 $\times 10^{-3}$ dec/s（或 1%/3s）。

2) 对通信和航行设备，还应增加下列要求。

定点频率：2MHz、3MHz、4MHz、6.2MHz、8.2MHz、12.6MHz、16.5MHz、18.8MHz、22MHz 和 25MHz；电压（有效值）：10V；调制频率：400Hz；调制深度：80%；频率扫描速率：1.5 $\times 10^{-3}$ dec/s（或 1%/3s）。

(2) 程序。按试验要求规定的参数施加于电源线、控制和信号线上进行试验。

由符合上述出版物有关规定的信号发生器发出骚扰信号，并经符合上述出版物有关规定的耦合/去耦网络直接施加于试验样品上。频率扫描速率应不大于 1.5 $\times 10^{-3}$ dec/s（或 1%/3s），以能检测出试验样品的任何故障。试验应符合 GB/T 17626.6—1998 的相关规定。

4 系统电磁兼容性测量

4.1 引言

实践证明，尽管组成系统的各个设备、分系统都满足设备级的电磁兼容性要求，但并不能保证它们组成系统后该系统完全兼容，因此有必要对整个系统进行 EMC 试验。同时，因为系统 EMC 试验是使系统运行在典型的预期工作方式下检查系统是否自身兼容，即使试验表明系统自兼容，但还不保证该系统装设到实际工作环境中时一定能与工作环境

电磁兼容。检查系统本身是否自兼容的试验测量以及将系统置于使用环境中进行以检查系统与其工作环境是否兼容的试验测量,统称为系统电磁兼容测量。

4.1.1 试验内容

针对船舶系统,从施工工艺、安全性、互干扰及环境适应性等方面考虑,应进行以下项目的 EMC 测量试验:安装工艺检查测量、电磁辐射危害测量、电源特性测量、电磁环境测量、天线耦合测量、互调干扰测量、设备间相互干扰试验、频谱特性测量与分析、安全裕度试验和电磁脉冲防护。

4.1.2 试验要求

系统级电磁兼容性测量是系统研制后期进行鉴定试验的必要组成内容,在该系统总的试验大纲中应包括独立的电磁兼容性试验计划,是由研制方拟定,提交使用方批准。在进行系统 EMC 测量前,应确定系统包括的所有分系统和设备应满足相应的设备和分系统级电磁兼容性标准要求或经过裁剪的特定规范要求。

系统级电磁兼容性测量试验场所的选择应经使用方批准,其环境电磁噪声电平应满足规定的要求。试验过程中,系统使用的外接电源(岸电)应满足规范中规定的电源质量要求,测量所用仪表应在计量有效期内。

4.2 安装工艺检查测量

船舶系统安装工艺检查包括安装质量检查和搭接、接地电阻及绝缘电阻测量两部分内容。

4.2.1 安装质量检查

按照船舶总体电磁兼容设计文件和技术要求,检查船舶接地系统配置和天线布置、设备布局、电缆敷设、金属构件的安装等是否符合电磁兼容规范。

4.2.1.1 接地系统配置及安装情况检查

对于金属船体的船舶,船体和与船体焊接在一起的金属结构可视为地,通过点焊或跨接线与船体连接且点焊点或跨接点间隔长度不大于 2m 的金属体可视为地,而铆接或螺栓连接的金属构件不能认为是地,若用跨接线将其连接可视为地。对于非金属船体的船舶,应安装专用接地系统。该系统由一对互相平行的扭绞铜带接至金属龙骨或安装于船舷外水线以下的接地板上,铜带的截面积应保证最远的连接点至接地板之电阻值小于 $2.5\text{m}\Omega$;接地板为面积不小于 0.5m^2 、厚度不小于 4mm 的黄铜板或镀锡的铜板,该系统可视为地。

露天区域和非金属舱室的所有电子电气设备外壳、电缆屏蔽层及露天区域的所有金属构件、门窗、舱口盖、吊车、起艇架、炮架、导弹发射架等必需进行可靠的电气接地,金属索具可进行绝缘或接地。

信息电子设备舱室内的所有电子设备、电气设备、屏蔽电缆、金属物体和其他舱室内的电子设备、屏蔽电缆必需进行可靠的电气接地。作战情报中心数据处理及自动测试装置应设计专用的单点信号地系统,但远离情报中心或数据系统舱室的各控制台或设备可不直接与主接地系统连接而就近接地。安装有上述装置的舱室及驾驶舱、作战情报中心、雷达室、无线电发信机室、电子对抗设备舱室的主、分接地系统应采用绝缘外护套的接地线,设备通过分接地系统与主接地系统连接时,连接点必须采用焊接,裸露部分应进行绝缘处理,避免与船体等地电位接触。

4.2.1.2 天线布置及安装情况检查

由于船舶甲板上可利用安装天线的空间有限,因此应尽量减少天线数量,宜采用多用途天线、有源天线和天线共用器、滤波器或其他天线综合利用装置。选择不同极化形

式、不同工作频段的天线和方向性强、副瓣小的天线,以降低天线间的耦合。

天线的布置和安装应符合以下规范:

(1) 各种天线应设置在较高和开阔的地方,并应远离船舶上层建筑和金属构件,其距离应不小于 1m。

(2) 发射天线应与接收天线和测向天线远离,应分散、分层布置。环形测向天线需安装在驾驶台上较高的地方,周围 2m 内应避免其他天线、吊杆、钢索和其他金属构件。

(3) 接收天线与甲板面电气电子设备的安装距离应不小于 3m。如不能满足,应采取措施减小电气电子设备辐射发射的影响,但最低不得小于 1m。接收天线间水平距离不小于 3m (小艇 2m)。

(4) 超短波天线、微波天线应分散、分层布置。超短波天线应安装在船舶桅杆较高处,并且不宜与同频段工作的天线及卫星导航、卫星通信天线布置在同一垂直高度。

(5) 雷达天线之间应尽量相互远离,其主波束应避免对通信、导航接收天线、同波段雷达天线面以及人员和燃油装卸口和通气口造成直接辐射。否则应采取措施保证人员、设备及燃油安全。米波雷达天线应与超短波通信天线及大功率短波发射天线远离。

(6) 安装众多天线的船舶可将通信天线分为发射天线组和接收天线组,一般将发射天线组设在船的中、尾部,接收天线组设在中、前部。两组间距应足够大。具有双工工作功能的通信设备,其发射天线与接收天线间隔应大于 50m;若不能满足,应采取其他隔离措施。

(7) 应选用具有外屏蔽层的同轴馈线或将同轴馈线敷入金属电缆管内。接收天线馈线也可由设备制造厂指定馈线。

(8) 同一桅杆上不同雷达天线的波导接口位置应彼此错开。

4.2.1.3 设备布置及安装情况检查

(1) 金属舱内设备的布置。有辐射敏感度要求的电子、电气设备与其他设备间的安装间距应不小于 10cm。敏感设备应远离强辐射源。同一舱室内易产生干扰的设备,与易受干扰的设备应相隔一定距离安装或采取有效的屏蔽措施。因总体需要安装在同一机架上的若干个有敏感度要求的电子、电气设备或分系统应作为一个整体,在装船前进行共架模拟试验。与无线电室无关的管道及电缆应避免从其中通过,若要通过必须采取有效的屏蔽及接地措施。

(2) 舱室的布局。无线电发射机室和接收机室应设置在靠近各自天线附近部位以缩短天线馈线长度及减小收发馈线间的相互串扰。安装电子设备的舱室,除海图室、无线电室外,其门、窗等开口应设在内走道上,并背向天线辐射区。海图室和无线电室通向露天甲板的门,应采用金属材料,并采取有效的接地措施。

(3) 露天区域及非金属舱室设备及设施的布置和安装。

1) 所有金属壳体设备及构件必须与金属船体进行可靠的电气连接。对于金属活动件,应具有两处以上的活动电气连接。

2) 在不影响性能的情况下,天线附近的构件、索具等应尽量采用非金属材料制造。

3) 桅杆支索、烟囱支索及短波发信天线及环形测向天线附近的金属索具应用绝缘子加以隔离,绝缘子间距一般为 2~5m,并在末端用绞铜线与船体良好搭接。天线附近规定为: 3m 内,发射功率小于 300W; 9m 内,发射功率在 300~200W。

4) 对于大张力索具、油船甲板及易燃挥发性油类的装

卸口、通气口附近的索具，应在两端采用能防腐并有足够厚度且能承受相应机械应力的铜导体牢固接地。小张力索具及环形测向天线周围的索具应绝缘。

- 5) 电力、照明电缆的间距一般不小于 1m。
- 6) 敷设在金属桅杆上的电缆应尽量穿入桅杆内或采用电缆罩或背向本舰有用辐射源安装。电缆屏蔽层应连续，禁止使用非金属外壳的接线盒、开关等（岸电开关箱除外）。
- 7) 有辐射敏感度要求的电气、电子设备及分系统与通信发射天线的安装距离应大于 3m。如不能满足，则应采取措施降低发射天线的影响，但最低不小于 1m。
- 8) 对露天区域的灯具等用电设备的电缆引入电网的传导发射应进行限制，满足电源供电要求。

9) 易燃挥发性油类装卸口及通气口设置应背离大功率辐射源，3m 内安装有相应等级的防爆设备。对安装有压力释放阀的通气管口周围 5m 内及对自由排气的通气管口周围 10m 内禁止安装可能构成着火危险的甲板机械。装卸口附近应为装卸易燃挥发性油类的设备设置接地装置。

4.2.1.4 电缆敷设及情况检查

各种电缆，尤其是传输信息的电缆，首先应根据设备或系统已试验过的敷设要求，考虑总体的具体情况作如下要求：

- (1) 甲板面天线附近电缆的屏蔽层应多点接地，至少在电缆的两端进行接地或穿金属管敷设。屏蔽的电力电缆和高频电缆的屏蔽层至少应在电缆两端接地。
- (2) 凡传输频率相近的信号（如低频段、射频段、脉冲信号），当其电平差值大于 40dB 时，不应采用同一根电缆传输。
- (3) 传输频率相近的信号，其高低电平差值大于 40dB 时（如声纳的发射馈线、通信机的发射馈线、雷达的调制脉冲线等），应单独或相互远离，其距离宜在 450mm 左右或穿金属管敷设。
- (4) 所有同轴线、屏蔽电缆均应有良好的屏蔽连续性。
- (5) 传输低频低电平的电缆，必须采用具有绝缘外护套的屏蔽电缆，其屏蔽层实施单点接地，若传感器有要求的，应先在传感器端接地。
- (6) 所有穿过电子设备舱室、贯穿露天甲板、上层建筑舱壁、耐压壳体进入露天区域的屏蔽电缆、波导管及金属管道等应在穿越处内侧接地，其接地线长度宜控制在 150mm。电缆接地点必须焊接。直径 20mm 以下的电缆允许成束接地，但每束不多于 3 根。直径大于 20mm 的电缆应单独接地。

4.2.2 接地电阻和绝缘电阻测量

在安装质量检查的基础上，对按要求必须进行搭接接地或进行绝缘处理的电子电气设备、电缆屏蔽层、金属构件、管道等部位，测量其直流搭接、接地电阻及绝缘电阻是否满足相关标准或产品技术设计和工艺设计要求。

4.2.2.1 搭接和接地电阻测量

接地和搭接电阻的要求对于人身安全、设备和设施的防护以及电气噪声的降低都有十分密切的关系。

- (1) 对于军用舰船。
 - 1) 金属船舶接地系统最远连接点至接地板之电阻值小于 2.5mΩ。
 - 2) 信号地单点接地系统主接地系统直流电阻值小于 2.5mΩ。
 - 3) 分接地系统（含设备至分接地系统连线）的接地直流电阻值小于 7.5mΩ。

- 4) 连接主接地电缆与船体接地点的短缆与船体焊接的直流电阻不大于 1mΩ。
- 5) 天线连接点的直流电阻小于 100 μΩ。
- 6) 屏蔽舱室所有金属舱壁、甲板和门窗应形成一个连续的导电面，导电面上任何两点间的直流电阻应不大于 10mΩ。
- 7) 其他需搭接、接地的部位，包括设备外壳、屏蔽电缆、露天区域金属构件等，其接地直流电阻应小于 10mΩ。

(2) 对于民用船舶，GB/T 10250—2007《船舶电气与电子设备的电磁兼容》规定的直流电阻标准值见表 9.2-24。

表 9.2-24 民用船舶搭接、接地直流电阻标准值

序号	测量对象	直流电阻值	每项测量点数
1	设备外壳	≤10mΩ	≥5
2	电缆屏蔽层、活动栏杆、索具等	≤10mΩ	≥3
3	天线接点	1mΩ	≥3

4.2.2.2 接地和搭接电阻的测量方法

(1) 测试配置如图 9.2-38 所示。数字式微欧表本身有电压和电流端子，连接时，电流引线夹的固定位置离搭接点较远，而电压引线夹的位置要靠近搭接点。

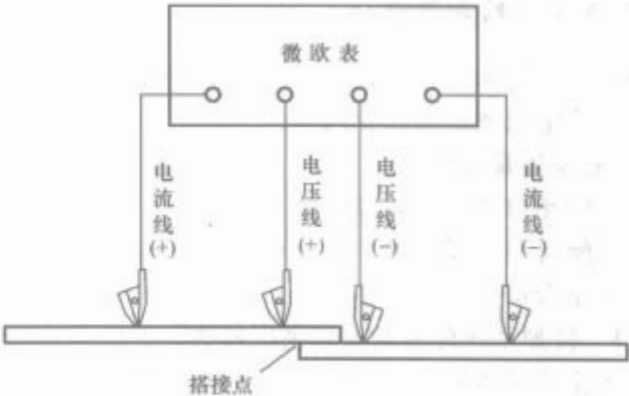


图 9.2-38 搭接和接地电阻测试配置

- (2) 为满足标准要求的测量精度，对于军用船舶，应选用分辨率优于 10 μΩ，测量误差小于 ±0.5% 的数字式微欧表；而对于民用船舶，微欧计的分辨率优于 100 μΩ 即可。
- (3) 进行测量时，应将被测件测点周围的污物及氧化层处理干净，直到露出金属光泽，再使用微欧计测量连接点的直流电阻，读取稳定值。
- (4) 按下列要求选择被测搭接或接地点和测量仪器的连接方式。
 - 1) 对于搭接，在被搭接的两金属表面上、搭接点附近进行测量。
 - 2) 对于设备信号地，一端在设备信号地上，另一端在被连接的分支接地电缆上进行测量且两点应在连接点附近。
 - 3) 对于分支接地电缆，一端在主接地电缆上，另一端在分支接地电缆上进行测量且两点应在连接点附近。
 - 4) 对于主接地电缆，一端在主接地电缆上，另一端在船体或接地板上测量且两点应在船体接地点附近。
 - 5) 对于设备机壳安全地，若设备信号地与安全地共用，则在连接点附近，一端在接地桩或跨接片附近，另一端在分支接地电缆上进行测量。若设备信号地与安全地绝缘，则在连接点附近，一端在接地桩或跨接片附近壳体上，另一端在连接点上测量。
 - 6) 对于非金属船舶的发射机机壳接地，在连接点附近，一端在发射机主接地电缆上，另一端在发射机柜或壳体上进

行测量。

7) 对于非金属船舶的天线调谐器接地缆, 在连接点附近, 一端在天缆上, 另一端在接地板或贯穿螺栓上进行测量。

8) 对于金属构件, 如活动金属件、金属管道、波导、金属索具、电缆槽及其盖板等, 在金属构件和连接点之间进行测量。

9) 对于一般屏蔽电缆, 在接头附近, 一端在电缆的屏蔽层上, 另一端在接地处上进行测量。

10) 对于敷设在桅杆电缆槽内的屏蔽电缆, 在电缆的屏蔽层接地器与桅杆之间进行测量。

11) 对于敷设在金属管内的屏蔽电缆, 若电缆屏蔽层外露, 在屏蔽层和金属管之间进行测量。

12) 对于屏蔽舱室内, 在屏蔽门、屏蔽舱壁、屏蔽窗中任意两者的表面上任选两点进行测量。对于进入屏蔽舱室内的电缆、金属管道、波导管, 在电缆屏蔽层、金属管道、波导管(法兰)和屏蔽舱室之间进行测量。

13) 对于屏蔽舱室, 在屏蔽舱室的接地处, 一端在屏蔽舱室上, 另一端在接地的连接点(船体或主接地电缆, 接地贯穿螺栓)上进行测量。

14) 对于外置滤波器, 在金属外壳和其与船体连接处间测量。

15) 对于多壳体信号地, 一端在各设备信号地上, 另一端在连接点附近、被连接的分支接地电缆上进行测量。

16) 对于主接地电缆和接地系统的最远点与船体的接地电阻的测量, 一端在船体接地点上, 另一端在主接地缆和接地系统的最远点上进行测量。根据实际需要, 可分段测量。

4.2.2.3 绝缘电阻测量

按舱面设施的布置和安装要求, 桅杆支索、烟囱支索及短波发信天线及环形测向天线附近的金属索具应采取绝缘措施。两绝缘面间的绝缘电阻值应大于 $10\text{M}\Omega$ 。高频绝缘子间的绝缘电阻值应大于 $50\text{M}\Omega$ 。

绝缘电阻的测量应在无凝露、无霜、无冰状态下进行。测试前应将被测点周围的污物及氧化层处理干净, 直至露出金属光泽。

测量所用的绝缘电阻表其测量范围应大于 $150\text{M}\Omega$, 输出电压 500V 。

4.3 电磁辐射危害测量

船舶大功率辐射设备发射时, 其有用信号会导致强电磁辐射环境, 从而对设备、人员、军械、燃油产生潜在危害。电磁辐射危害的测量包括了舱室内电磁能量泄漏测量、甲板面关键区域(人员活动区域、电引爆武器安装部位、燃油作业区、露天设备安装部位)场强测量及金属物体感应电压测量。频率范围为 $10\text{kHz}\sim 40\text{GHz}$ 内大功率发射设备所产生的泄漏场、露天部位辐射电磁场及 500MHz 以下频率的金属物体感应电压。

4.3.1 测量要求

4.3.1.1 测量工况

所有发射分系统、设备进行功能性试验合格、工作正常后, 应选择最恶劣的电磁环境工况进行试验。

(1) 单个辐射源电磁环境测量时, 要求对该辐射源的电磁环境有影响的其他辐射源停止发射。

(2) 影响本电磁环境测量的分系统、设备应按实际情况配置, 对系统周围及内部的无关装置、构件及杂物进行清理。

(3) 要求测量用仪表或系统不能影响实际辐射场的分布, 测量过程中非工作人员不能进入。

(4) 关掉被测辐射源后的电磁环境电平至少应比允许的电磁环境电平极值低 6dB 。

4.3.1.2 仪表特性要求

(1) 场强测量的探头必须足够小, 并且只对特定的参数响应, 不希望有寄生响应。

(2) 探头及其到仪表的引线不应严重改变探头附近的场, 探头引线不应将干扰场引入探头或仪表, 尽量采用光纤及高阻线作为探头引线。

(3) 仪表应使用自备电源。当采用有外引线的自备电源时, 应采取屏蔽及滤波等对外部场隔绝的措施; 当使用电池时, 仪表应有电源检查开关, 电池容量应保证仪表连续正常工作 8h 以上。

(4) 场强仪能响应电磁场的所有极化分量。一般采用各向同性探头, 各向同性误差应小于 $\pm 0.5\text{dB}$ 。

(5) 仪表应具有足够的峰值容限, 以防仪表被某些低占空比场破坏, 具有宽带频率响应, 频响引入的误差应小于 $\pm 2\text{dB}$ 。

(6) 表体及其连线的屏蔽效能应能保证表体及引线暴露于被测场强时, 仍能保持仪表精度。

(7) 应给出仪表得到准确读数所需的响应时间以及仪表对信号调制方式的响应。

(8) 应给出仪表工作的温度、湿度、压力及振动、冲击工作范围, 仪表在该范围内工作时, 测量精度仍应保持在其额定指标范围内。

4.3.1.3 对危害场测试准备

在测量潜在危害电磁场之前, 应了解被测系统各种场源的性质及其布置情况, 尽可能清楚地确定场源传输特性, 估算待测场强, 选择较适当的测量仪表及测量方法。

(1) 危害辐射场类型及其传输特性。辐射源的特性主要包括如下内容: 场源类型及发射功率, 工作频段及频率; 脉冲宽度、冲重复频率, 调制特性、脉冲值、平均值、扫描或旋转特性; 源的数量; 极化、谐波频率、寄生频率, 源到测试位置的距离及可能影响测试位置场的吸收或散射体的有关情况。

(2) 危害场估算。当已知天线增益时, 发射天线远场轴线上功率密度可计算为

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (9.2-19)$$

式中: P_d 为波束轴线上任一点的功率密度, W/m^2 ; P_t 为馈给天线的净功率, W ; G_t 为发射天线的有效增益; d 为测点距发射天线的距离, m 。

当天线增益未知时, 可以用下式计算

$$P_d = \frac{A_e P_t}{\lambda^2 d^2} \quad (9.2-20)$$

式中: P_d 为波束轴线上任一点的功率密度, W/m^2 ; P_t 为馈给天线的净功率, W ; A_e 为发射天线的有效面积, m^2 ; λ 为波长, m ; d 为测点距发射天线的距离, m 。

也可用天线口径几何面积 A 代替有效面积 A_e 。几何面积一般大于有效面积, 因而估算值大于实际值。式(9.2-20)也可用于估算大于 $0.5\alpha^2/\lambda$ 距离的功率密度, 其中 α 是最大口径尺寸。

对于喇叭和反射面等大辐射体, 辐射近场区的最大功率密度值可以由下式计算

$$P_d = \frac{4P_t}{A} \quad (9.2-21)$$

当不存在反射时,由上式预测的值与正确值相差通常在 3dB 之内。

4.3.2 漏泄场测量

大功率发射源机壳漏泄场有时也可达到很强的程度,构成对人员等的危害,因而对大功率发射机的机壳漏泄场应予以测量。

(1) 人员非离子电磁辐射的安全限值见表 9.2-25~表 9.2-28。

表 9.2-25 作业区短波、超短波、微波连续波暴露限值

频率 f (MHz)		连续暴露平均 电场强度 (V/m)	连续暴露平均 功率密度 (W/m ²)	间断暴露 一日剂量 (W·h/m ²)
短波	3~30	$82.5/\sqrt{f}$	$18/f$	$144/f$
超短波	30~300	15	0.6	4.8
微波	300~3×10 ³	15	0.6	4.8
	3×10 ³ ~10 ⁴	$0.274/\sqrt{f}$	$f/5000$	$f/625$
	3×10 ⁴ ~10 ⁵	27.4	2	16

间断暴露最高允许限值:3~10MHz 时为 610/fV/m,10~400MHz 时为 10W/m²,400~2×10³MHz 时为 f/40W/m²,2×10³~3×10⁵MHz 时为 50W/m²。

表 9.2-26 作业区短波、超短波、微波脉冲波暴露限值

频率 f (MHz)		连续暴露平均 电场强度 (V/m)	连续暴露平均 功率密度 (W/m ²)	间断暴露 一日剂量 (Wh/m ²)
短波	3~30	$58.5/\sqrt{f}$	$9/f$	$72/f$
超短波	30~300	10.6	0.3	2.4
微波	300~3×10 ³	10.6	0.3	2.4
	3×10 ³ ~10 ⁴	$0.194/\sqrt{f}$	$f/10\ 000$	$f/1250$
	3×10 ⁴ ~10 ⁵	19.4	1	8

间断暴露最高允许限值:3~10MHz 时为 305/fV/m,10~400MHz 时为 5W/m²,400~2×10³MHz 时为 f/80W/m²,2×10³~3×10⁵MHz 时为 25W/m²。

表 9.2-27 生活区短波、超短波、微波连续波暴露限值

频率 f (MHz)		平均电场强度 (V/m)	平均功率密度 (W/m ²)
短波	3~30	$58.5/\sqrt{f}$	$9/f$
超短波	30~300	10.6	0.3
微波	300~3×10 ³	10.6	0.3
	3×10 ³ ~10 ⁴	$0.194/\sqrt{f}$	$f/10\ 000$
	3×10 ⁴ ~10 ⁵	19.4	1

表 9.2-28 生活区短波、超短波、微波脉冲波暴露限值

频率 f (MHz)		平均电场强度 (V/m)	平均功率密度 (W/m ²)
短波	3~30	$41/\sqrt{f}$	$4.5/f$
超短波	30~300	7.5	0.15
微波	300~3×10 ³	7.5	0.15
	3×10 ³ ~10 ⁴	$0.137/\sqrt{f}$	$f/20\ 000$
	3×10 ⁴ ~10 ⁵	13.7	0.5

(2) 漏泄场测量所用仪表,对于射频辐射源,应采用场强测量仪;对于微波辐射源,应采用微波漏能仪进行测量。

(3) 漏泄场强一般属近场场强,主要发生在机壳的进出口、孔、缝隙、指示度盘、馈线、波导接头等部位,因此应针对这些部位进行测量。除此之外,测试部位还应包括:

1) 辐射源设备人员经常操作的部位及受辐射源影响的固定站位,以作业人员相对于辐射源设备的实际姿态取眼部、胸部、腹部三点。

2) 辐射源设备及辅助设备所处的空间区域。

通常漏泄场强随与机壳距离的平方急剧锐减,因而测量时应由远而近,缓慢地进行,以避免人员及仪表受到损伤。由于漏泄场的分布具有较大的梯度,因而要求测量探头具有小的尺寸,一般应不大于 30cm,以便具有良好的分辨率,准确地测得各点的场强。

4.3.3 甲板面关键区域危害场强测量

4.3.3.1 军用舰船甲板面关键区域电磁环境要求

电引爆武器安装位置处的电磁环境要求见表 9.2-29,舰船甲板上和发射机主波束下工作的外部电磁环境要求见表 9.2-30、表 9.2-31。

表 9.2-29 电引爆武器安装位置处的电磁环境

频率 (MHz)	电场 (V/m)			
	不限制		限制	
	峰值	平均值	峰值	平均值
0.01~2	70	70	70	70
2~30	200	200	100	100
30~150	90	61	50	50
150~225	90	61	90	61
225~400	70	70	70	70
400~700	1940	260	1500	100
700~790	290	95	290	95
790~1000	2160	410	1500	100
1000~2000	3300	460	2500	200
2000~2700	4500	490	2500	200
2700~3600	27460	2620	2500	200
3600~4000	9710	310	2500	200
4000~5400	7200	300	2500	200
5400~5900	15 970	300	2500	200
5900~6000	320	320	320	200
6000~7900	1100	390	1100	390
7900~8000	860	860	860	200
8000~8400	860	860	860	200
8400~8500	390	390	390	200
8500~11 000	13 380	1760	2500	200
11 000~14 000	2800	390	2500	200
14 000~18 000	2800	350	1500	200
19 000~40 000	7060	420	1500	200
40 000~45 000	570	570	200	200

表 9. 2-30 舰船甲板上工作的外部电磁环境要求

频 率	飞行甲板		露天甲板	
	电场 (V/m)		电场 (V/m)	
	峰值	平均值	峰值	平均值
10kHz~2MHz	45	45	/	/
2~30MHz	100	100	200	200
30~150MHz	61	61	61	61
150~225MHz	61	61	61	61
225~400MHz	61	61	61	61
400~700MHz	151	71	151	71
700~790MHz	162	95	162	95
790MHz~1GHz	1125	99	1125	99
1~2GHz	550	112	550	180
2~2.7GHz	184	158	184	158
2.7~3.6GHz	2030	184	2030	184
3.6~4GHz	290	200	290	200
4~5.4GHz	290	200	290	200
5.4~5.9GHz	345	200	345	200
5.9~6GHz	345	200	345	200
6~7.9GHz	345	200	345	200
7.9~8GHz	345	200	345	200
8~8.4GHz	345	200	345	200
8.4~8.5GHz	483	200	483	200
8.5~11GHz	510	200	510	200
11~14GHz	310	200	310	200
14~18GHz	310	200	310	200
18~40GHz	200	200	200	200
40~45GHz	200	200	200	200

表 9. 2-31 在舰船上发射机主波束下工作时的外部电磁环境要求

频 率	电场 (V/m)	
	峰 值	平均值
10kHz~2MHz	200	200
2~30MHz	200	200
30~150MHz	200	200
150~225MHz	3120	270
225~400MHz	2830	240
400~700MHz	4000	750
700~790MHz	3500	240
790MHz~1GHz	3500	610
1~2GHz	5670	1000
2~2.7GHz	21 270	850
2.7~3.6GHz	27 460	1230
3.6~4GHz	21 270	850
4~5.4GHz	15 000	610
5.4~5.9GHz	15 000	1230
5.9~6GHz	15 000	610
6~7.9GHz	12 650	670
7.9~8GHz	12 650	810
8~14GHz	11 270	1270
14~18GHz	11 270	614
18~40GHz	5000	750

4. 3. 3. 2 民用船舶甲板面关键区域电磁环境要求

对于民用船舶,甲板面电磁环境要求主要仍是对人员安全的要求。安全限值见表 9. 2-25~表 9. 2-28。

4. 3. 3. 3 测量部位

(1) 探头距离周围的金属物体应不小于 30cm,距离被测部位金属部分 30cm。

(2) 在露天人员活动区选择测试部位。在 0. 5m~2m 高度上连续测量,取最大场强点。尤其应测量的重点位置为:对于立姿人员,取标准人体身高的头(眼)、胸、下腹三个部位,离甲板高度分别为 1. 6m、1. 3m、1. 0m;对于坐姿人员,取标准人体身高坐姿的头(眼)、胸、下腹三个部位,离甲板高度分别为 1. 2m、1. 0m、0. 8m。

(3) 在军械周围选择测试点。当 $L<1/8\lambda$ 时,传感器置于被测军械体中部的上、下、左、右进行测量;当 $1/4\lambda\leq L\leq 1/8\lambda$ 时,传感器置于被测军械体首部、尾部的上、下、左、右、前(后)进行测量;当 $L>1/4\lambda$ 时,传感器置于被测军械体至少首部、中部、尾部的上、下、左、右、前(后)进行测量。对于场强变化较剧烈的区域,应对区域内点进行测量,并记取最大值。

(4) 在燃油作业区,场强测量一般应测量燃油容器及燃油舱的输油口及通风口、通风孔等部位的场强值,在距离测试部位 30cm 处测量。对燃油加注装置部位的场强,应按装置的实际高度、溢出部位、喷嘴等对象分别进行。易燃物堆放或输送设备在舰船上所占面积或体积较大时(任何方向的尺寸超过 30cm),应每隔 30cm 增加一个测量点。探头的支架必须使用非金属材料,测量人员应尽量远离测量探头架设位置,并避免在辐射方向上造成遮挡。

(5) 安装在露天区域的有电场辐射敏感度要求的电气、电子设备周围 30cm 处。

4. 3. 3. 4 测量频率

在发射源工作的频率范围内,至少应在超短波、短波、中波所包括的频率范围内各选取高、中、低及常用频率各一个作为试验频率;对于军械危害场强测量,所选择的试验频率里应尽量含有其 $1/4\lambda$ 等于或接近导弹体几何尺寸的频率,短波段至少选取高中低三个试验频率,其他波段每 10 倍频程选取两个频率,不足 10 倍频程则选取 1 个频率。

4. 3. 3. 5 测量步骤

(1) 确定辐射源特性及发射天线特性,估算各测试点的场强值。

按发射源的工作频率、特性及估算场强选择合适的测量仪表,微波场强测量选用微波漏能仪,射频段场强则用宽带场强计进行测量。

(2) 辐射源按选定的频率,大功率或额定功率发射。对于微波辐射源,应使其天线的照射角度处于使被测部位场强最大的位置。

(3) 待辐射源发射稳定后,读取测量仪表显示和稳定值并记录,必要时转动传感器,寻找场强的最大值。

(4) 由于人员及表体等的反射可能改变探头周围的场,对测量结果造成影响,因而测量时应采用探头支架,人员及表体应位于比探头更远离场源的地方。在进行超过人员危害限值的场强测量时,人员应远离场源或穿戴性能良好的屏蔽服。

4. 3. 4 综合场测量

在系统实际工作情况下,往往是多个电磁发射源,如多部雷达及多部电台同时发射,这就形成了综合场。

当进行综合场测量时,应使用各向同性的宽频带探头进

行测量,探头不加修正值的频率范围应覆盖所有发射源的发射频率。

由于现有的场强测量仪表一般不能覆盖危害场频率范围,也由于综合场的复杂性给人员的防护及测试仪表馈线的布放带来一定困难,因而一般推荐采用分别测量的方法来确定综合场。首先,分别选取适应于测量不同发射源场强的测量仪表及方法进行分别测量,将测量值均换算为功率密度值或场强值。若各发射源为不相关的发射源,则将各发射源在某点形成的功率密度值(或场强值的平方)相加,就可得到该点的综合功率密度值(或场强值的平方)。

4.3.5 金属体表面感应电压测量

测量处于密集布置和电磁辐射环境中的金属物体,有较强的天线效应,能拾取和截获电磁能量,于是在其表面形成电压和电流。当人体偶然接触被电磁辐射激励的金属物体时,射频电流流入人体或人与被射频激励的金属物体足够接近时由电容耦合产生电火花而造成射频灼伤。电磁辐射对人员能触及到的金属体感应电压应小于100V。

按此要求,应在大功率发射天线附近人员易触及的金属体部位处选择测试点进行测量。测量使用的仪表为便携式的金属体感应电压表(频率范围在500MHz以下)。本舰辐射源在工作频段的低中高各取三个频点以额定功率发射。手持感应电压表,将其探针抵到被测金属物上,保证探针与被测金属体良好接触,读取感应电压测量值。选取人体易触及的部位,两测量点之间距离为1.5m,不足1.5m的选取一点。

4.4 电源特性测量

测量船舶系统的电源特性是十分重要的,这些测量可用不同的方式进行。将测量结果与电源规范、设备传导敏感度相比较,可得出相应的EMC安全裕度。

4.4.1 电源品质测量

(1) 要求。在正常运行状态下,交流电网电压波形畸变率不应超过基波的5%,最大单次谐波成分应不超过基波的3%,直流电网的纹波电压应不超过额定电压的2%。

(2) 测试方法。

1) 交流电网电压波形畸变率测试。测量所用的电力品质分析仪要求总波形畸变率测量精度优于±5%,能测量高次谐波(一般不少于50次),单次谐波的测量精度优于±1%。

测量线路直接跨接在电网的两个相线之间。如果被测对象是特殊的三相四线制电网时,则应将测试线路接在相线与中线之间,同时必须将测量仪表及其电源与船舶地相隔离。在确定所有指定的设备都正常工作后,从测量仪表上读出测量数据。

2) 直流电网纹波系数的测量。测量所用的示波器量程范围为0~100V,测量精度应优于±1.5%,频响带宽为连续波信号不小于10MHz。

示波器探头的两端直接接在直流电网的输出端。为安全起见,应先关闭配电板上相关设备,同时切断配电板开关,然后才在指定的配电板上进行测试线路布置。完成测试布置后,将配电板上的各用电设备逐个开启并保持正常工作状态(要求都处于较高功耗状态)。在确认所有指定的设备都正常工作后,从测量仪表上读出直流电源的最大波动值或直接读出直流纹波系数值。

在只记录最大电压波动的情况下应按下式计算实际直流纹波系数

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_0} \times 100\% \quad (9.2-22)$$

式中:δ为直流纹波系数;ΔU为最大电压波动值;U₀为直流电压标称值。

4.4.2 电网传导干扰测量

当电子、电气设备正常工作时,在安装有敏感度、发射极限值要求的电子电气设备舱室的配电箱处测量电网传导干扰。

电网传导干扰的测量方法有电压法和电流法两种。主要测量仪器均为电磁干扰测量仪,分别用电流探头及高通网络采样。电压法测试布置如图9.2-39所示,电流法测试布置如图9.2-40所示。

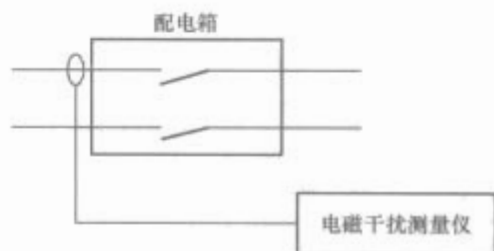


图 9.2-39 电网传导干扰测量布置 (电流法)



图 9.2-40 电网传导干扰测量布置 (电压法)

4.4.3 电网尖峰信号传导发射测量

接在船舶电网上运行的大功率脉冲性负载设备、大功率负载的切换及辅助电源设备的操作都会在电网上引起强瞬变信号干扰。

(1) 要求。为保护有传导敏感度要求的电气、电子设备及分系统能正常工作,分电箱处测得的尖峰信号传导发射值应不大于1.75倍电源电压(有效值)且最高不超过300V。

(2) 测试方法。电网尖峰信号传导发射测试布置如图9.2-41所示。测量所用记忆示波器带宽大于100MHz,高通滤波器的低端截止频率应低于10kHz。

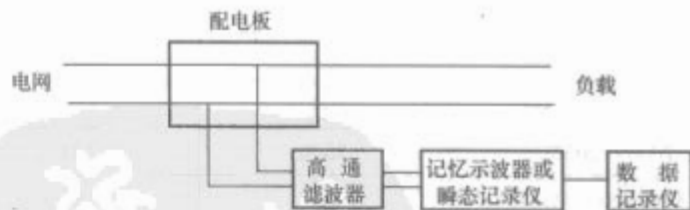


图 9.2-41 电网尖峰信号传导发射测量布置

对要求测量的电源线,按图9.2-41布置连接后,船上共用电网的设备通电,所测分电箱的分系统或设备通电。依次通断容易引起电网瞬变的设备,记录每次通断时的电网尖峰信号传导发射时域波形。

4.5 电磁环境测量

电磁环境测量包括试验区环境电磁环境测量、大功率辐射源造成的危害电磁环境测量、舱室电场测量及磁场测量。其中危害电磁环境测量已在4.3节加以介绍。

4.5.1 试验区电磁环境测量

在进行天线耦合测量、互调干扰试验、设备间相互干扰

试验之前,为保证在试验过程中所获得的反应确实为实验项目所引起的预期反应,需要在试验开始前对试验区电磁环境进行监测。

(1) 测量仪器。测量接收机(电磁干扰测量分析仪或频谱分析仪)、数据记录仪、天线。

(2) 测量要求。测量在四周无遮盖物的露天甲板上进行。测量仪器与人员应尽量远离测量用天线,以避免仪器和人员影响测量点的场分布。测试期间船上的电子设备和无关的电气设备应关机,配合船舶电磁兼容性试验且在试验期间必须工作的辅助电气设备如发电机组等通电工作,其电磁辐射发射应计入环境电平。

4.5.2 舱室电场测量

在舰上大功率辐射源发射时,应在安装有敏感度要求设备的舱室及其他舱室进行 10kHz~1GHz 频率范围内电场的测量。

对于军用舰船,使用峰值检波的电磁干扰测量仪测量信息电子设备舱室内距金属壳体 30cm 处电场值应小于 10V/m;对于民用船舶,使用准峰值检波的电磁干扰测量仪测量电子设备舱室内距设备金属壳体 30cm 处电场值应小于 100dB μ V/m。

测试所用仪器同 4.5.1 节。测试过程中,天线置于测量位置,天线距金属物体不小于 30cm。

(1) 拉杆天线架设高度为地网距地板 60cm,双锥天线架设高度为天线顶部到顶部中心距地板 100cm,双峰波导天线或对数周期天线架设高度为天线中心线距地板 100cm。

(2) 测量仪器与人员应尽量远离测量用天线,以避免仪器和人员影响测量点的场分布。

(3) 选择安装有敏感度要求的设备舱室及其测量位置。一般情况下,对于舱室内无物体遮挡的最大水平尺寸小于 3m,选取一个测量位置;最大尺寸大于 3m,每隔 3m 选取一个测量位置。对于 30MHz 以上的频率,天线应取水平极化和垂直极化两个方向。

(4) 发射源工作的频率范围内,至少应在超短波、短波和中波所包括的范围内选取高、中、低及常用频率各一个作为试验频率,同时还应选取干扰或危害较大的特殊频率,如接收设备的中频、视频等,在这些频率上工作的发射源必须以设计最大功率或额定功率发射。

(5) 在需要时,微波辐射源对舱室电场的影响也应加以测量,在这种情况下,测量的频率范围上限应从 1GHz 扩展到 18GHz 乃至 40GHz。

4.5.3 磁场测量

(1) 要求。安装有阴极射线管设备及其他有磁场敏感度要求的设备,其安装位置的磁通密度应不大于 30 μ T。磁场测量所需磁场测量仪,其分辨率优于 10 μ T,测量范围大于 2mT。

(2) 测量方法。当舱内电气、电子设备正常工作时,将磁场测量仪探头放置于距被测设备外壳 5cm 处,以搜索方式进行探测,直至找到最大值为止,记录磁感应强度。为避免磁场敏感设备本身磁场发射对测量结果的影响,被测设备应不开机。

4.6 天线干扰耦合测量

天线干扰耦合测量是解决由于天线之间相互作用产生电磁干扰的一种手段。作为衡量天线之间相互作用程度的天线耦合度是电磁兼容性的重要参数。同一艘船上天线会通过天线之间的耦合在各自天线上产生不需要的信号功率,经由天

线传导到设备内部造成干扰。这种天线耦合现象在船舶系统中普遍存在,造成的电磁干扰后果十分严重,以使天线位置布局的选择成为船舶电磁兼容性设计中的关键问题。天线干扰耦合测量是直接从实验测量中获得天线耦合度参数的方法。通过测量,确定天线间相互作用程度,对系统电磁兼容性作出评价。

4.6.1 测量界面

天线干扰耦合测量有严格的测量界面要求,选择不同的测量界面会产生不同的测量结果。测量界面选在天线体根部端口的测量称为天线干扰耦合测量,测量界面不在天线体根部端口的测量,称为天线系统干扰耦合测量。天线系统干扰耦合测量是一种除包含有天线体外还包含有馈线电缆或设备装置(如天线转换开关、调谐匹配器、耦合装置、共用装置等)的测量。天线干扰耦合测量界面划分如图 9.2-42 所示,A 为发射天线根部入口,B 为接收天线根部入口。对于发射天线,A 点右边是天线,左边是与天线根部输入端口相连的馈线电缆(或除天线以外的设备);对于接收天线,B 点左边是天线,B 点右边是与天线根部输出端口相连接的馈线电缆(或除天线以外的设备)。严格的天线耦合测量,用于测量的仪器设备(如定向耦合器,通过式功率计)必须置于 A 点和 B 点。实际测量中如遇到困难必须使用电缆或波导连接天线端口与测量仪器时,该电缆的长度应足够短,使其不影响测试结果。反之,测试点不再是 A 点和 B 点的,不再是天线耦合测量,而是属于天线系统耦合测量。

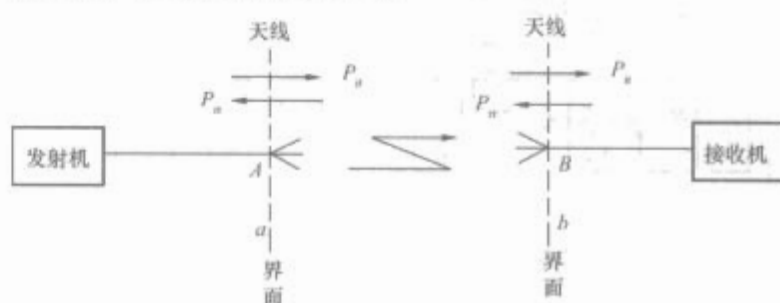


图 9.2-42 天线干扰耦合测量界面

4.6.2 定向耦合器测量天线耦合度

定向耦合器(或双定向耦合器)可以方便地进行入射、反射功率测量,许多用于驻波比、反射系数、阻抗等天线参数测量的仪器设备中均含有定向耦合器。测试时将双定向耦合器在 A 点和 B 点处串接入天线馈线接口处,双定向耦合器测量天线耦合度框图如图 9.2-43 所示。

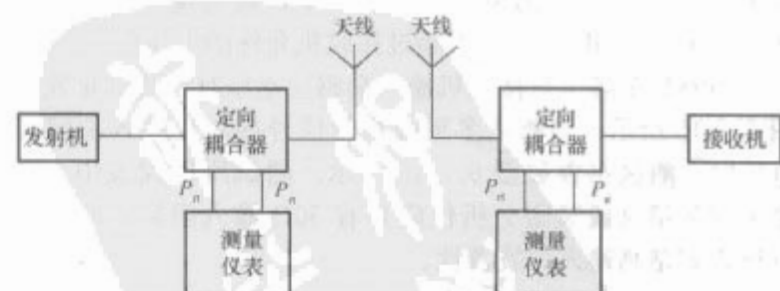


图 9.2-43 双定向耦合器测量天线耦合度框图

双定向耦合器输出端与测量仪表之间采用 50 Ω 同轴电缆连接。测量仪表的选择根据测量要求和精度确定,满足测量要求的功率计、电压表、频谱分析仪等均可作为测量仪表。在双定向耦合器的“入射功率输出”和“反射功率输出”端口可直接测量发射天线的入射功率 P_n 和反射功率 P_r 以及接收天线的入射功率 P_{ir} 和反射功率 P_{rr} ,则天线耦合度为

$$C = 10 \lg \frac{P_r}{P_t} = 10 \lg \frac{P_{ir} - P_{rr}}{P_{it} - P_{rn}} \quad (9.2-23)$$

式中: C 为天线耦合度, dB; P_r 为接收天线纯净输出功率, W; P_t 为发射天线纯净输入功率, W; P_{ir} 为接收天线入射功率或称输出功率, W; P_{rr} 为接收天线反射功率, W; P_{it} 为发射天线入射功率或称输入功率, W; P_{rn} 为发射天线反射功率, W。

4.6.3 天线系统耦合度测量

最简单的天线系统是由天线和馈线电缆组成。复杂的天线系统包括天线、馈线、天线转换开关、调谐匹配装置、耦合装置、共用装置等。通常把发射机输出端以外的馈线电缆(波导)设备均看作天线系统。

天线系统耦合度测量与天线耦合度测量方法相同, 不同之处仅在于测点不是同时选择在 A 点和 B 点。图 9.2-44 为 10m 鞭状天线系统耦合度测量。自动天线调谐器接在 10m 鞭状天线根部, 两根长 30m 同轴电缆分别同 1kW 系统和 400W 系统收发天线开关连接, 共使用 4 个双定向耦合器分别串接入各自发射机输出端和接收机输入端。入射、反射功率测量及耦合度计算均与天线耦合度测量相同。这是一个典型的天线系统耦合度测量范例, 天线系统中包括天线、天线调谐器、电缆和收发开关, 双定向耦合器均串接在发射机输出端和接收机输入端。测试仪表被安放在舱室内。

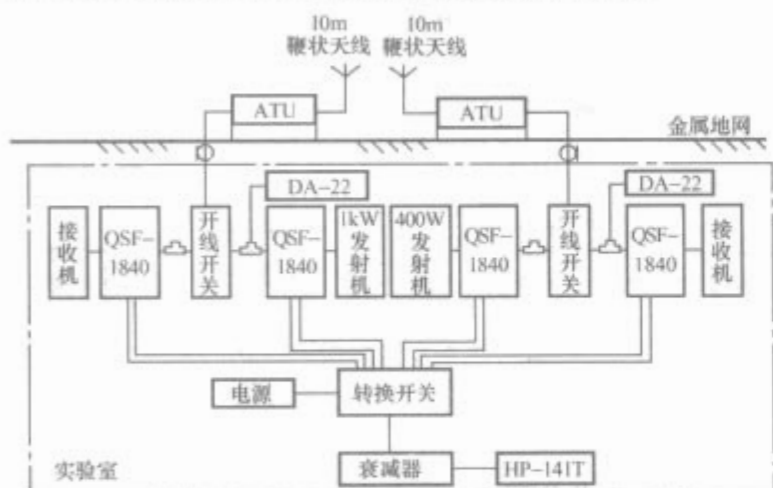


图 9.2-44 10m 鞭状天线系统耦合度测量

4.6.4 接收机信号输入端感应电压测量

为保护接收机的安全, 天线的布置应使各接收天线在 50Ω 负载上对 14kHz~18GHz 范围内耦合的感应电压符合下列要求: 当本船发射机工作时, 感应电压大于 60dBμV, 但不大于 100dBμV 的频点不多于 1 个, 其余频率的感应电压应不大于 60dBμV, 或不超过接收机允许的电压值。

当测量单频信号接收机输入端感应电压时, 测试布置如图 9.2-45 所示; 当测量多频或宽带信号接收机输入端感应电压时, 测试布置如图 9.2-46 所示。测试所用仪表中, 电磁干扰测量仪或频谱分析仪应具有 50Ω 输入阻抗, 而宽带电压表则是高输入阻抗特性。

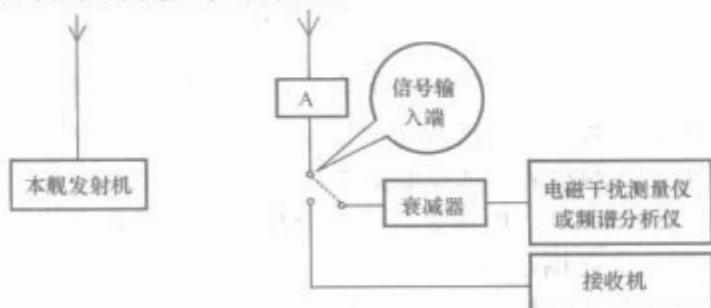


图 9.2-45 单频信号接收机输入端感应电压测量布置

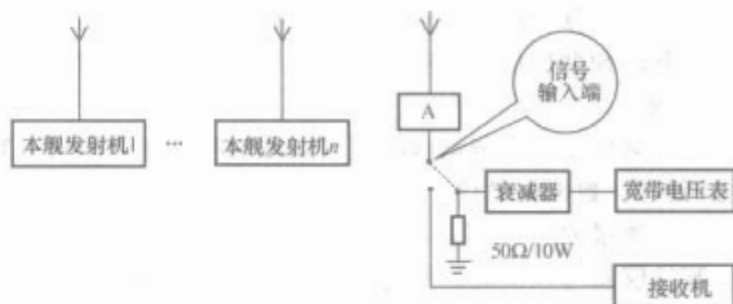


图 9.2-46 多频或宽带信号接收机输入端感应电压测量布置

将测量仪表连接在信号输入端, 按工作频率、天线相对位置、天线耦合特性选定合适的本舰大功率辐射源和发射天线, 按大功率或额定功率状态进行发射。读取测量仪表指示的感应电压值。

4.6.5 电源网络与无线电接收天线间的去耦值

对于非金属船舶、电力和电源电缆未采取屏蔽措施或甲板面接收天线附近有电力或电源电缆经过的情况下, 电源网络中的射频传导干扰有可能会经由线场耦合在接收天线根部形成感应电压, 进而对接收机造成干扰。因而在电源网络与无线电接收天线间应有一定隔离度。

(1) 测量方法。信号发生器输入至少为 1V 调幅信号的射频电压 (U_g), 经 0.1 μF 隔离电容接在注入点和最靠近的船体(地)之间。注入点应在主配电板上或尽可能靠近主配电板方便的电源端子上以及最靠近接收天线敷设的电源或电力电缆的分配电板上, 在注入位置处用适当的电压表测量射频电压。

电源网络射频传导干扰在接收天线处形成的电场可以用经过校准已知系数的有源拉杆天线接收。在测量位置上的船舶天线应拆除或与接收机断开。测量天线置于原天线位置处或其附近, 但应尽可能远离大型垂直金属部件。

(2) 天线去耦系数 C 按下式计算

$$C(\text{dB}) = U_g - U_r - F_a \quad (9.2-24)$$

式中: C 为天线去耦系数, dB; U_g 为注入电压, dBμV; U_r 为与测量天线相连的干扰测量仪输入电压, dBμV; F_a 为天线修正系数, dB。

4.7 互调干扰测量

锈蚀螺栓效应是船舶系统一种严重的潜在干扰源, 它是由于在强电磁场中船上金属构件连接处的金属一氧化物一金属呈现非线性, 两个以上的信号在这些非线性接头处混频产生新的频率即互调产物。此外, 接收机内非线性器件也有相同的效应。当两个以上的信号进入接收机内部的混频器后, 同样会因混频产生互调产物。互调干扰测量一般是在装有两台以上射频通信发射机的船舶上进行的, 目的在于检验互调产物对接收机的影响。具体试验和测量方法如下:

(1) 互调干扰的测量布置如图 9.2-47 所示。在船上的发射机与接收机中选择两台发射机与一台接收机。发射机工作在最大功率状态, 并分别连接到两个能覆盖最大甲板面区域的天线上。接收机最好与一个设备在船体中部的天线连接。

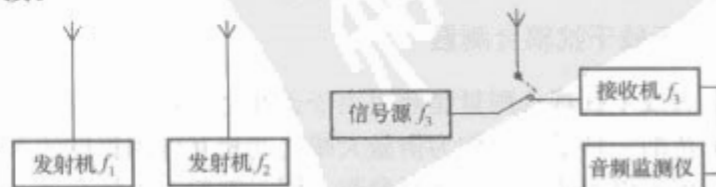


图 9.2-47 互调干扰的测量布置

(2) 设定两台发射机的工作频率分别是 f_1 和 f_2 , 接收机调谐在三阶互调频率 ($2f_1 \pm f_2$ 或 $2f_2 \pm f_1$)。 f_1 和 f_2 不成谐波关系, 并且它们与三阶互调频率之间有适当的频率间隔, 以防止收发耦合干扰造成接收机过载或不真实的试验结果。

(3) 如果接收机出现受干扰现象, 应交替关闭两台发射机, 如干扰现象均消失, 则该干扰为互调干扰。

(4) 在捕获互调干扰后, 将音频电压表 (或适用仪器) 连接在接收机音频输出端, 读取并记录输出指示。

(5) 发射机停止发射。断开接收机天线, 将信号源从天线断开处与接收机相连。调节信号源频率, 使接收机输出最大, 然后调节信号源输出幅度, 直到音频电压表 (或适用仪器) 指示与互调干扰产物相同为止。读取并记录此时信号源的频率和输出电平。

(6) 可以用相同的方法进行高阶互调干扰测量。

4.8 设备间相互干扰试验

使整个系统处于运行状态, 使可能产生干扰的设备工作在最大功率与关键频率, 使可能受扰的设备以最敏感的方式工作, 以此验证系统在预定的电磁环境下工作时的自兼容性。

4.8.1 试验准备

互干扰试验应在完成安装质量检查、搭接和接地电阻测量以及绝缘电阻测量, 已确定船舶所有结构的连接、接地和绝缘满足设计要求的前提下进行。

确认在有关位置安装的多路耦合器、滤波器和消隐装置能正常工作, 确认没有遗漏电子设备和天线, 没有存在明显故障的电子设备和天线。所有与试验无关的物品与人员撤离试验现场。试验前在露天甲板上进行试验区电磁环境监测。

4.8.2 试验方法

4.8.2.1 设备选择

(1) 监测接收设备选择。利用系统本身配置的接收机作为干扰监测设备, 接收设备选择时不仅应考虑到能够监测每一个规定的频段, 而且也要考虑到在同频段内每种不同类型的接收设备至少使用一台, 每台接收设备和天线至少使用一次。在试验前, 应检查每台接收机, 使其灵敏度满足技术条件要求。

当干扰发射源工作时, 可调谐的接收机应在整个调谐范围内进行搜索, 并确保接收天线最靠近发射天线的接收机保持接收状态。应在整个调谐频段内搜索因过载和船舶装备非线性连接产生电弧或互调制形成的电磁干扰。

应使用实际最大的灵敏度 (即在不引起接收机过载的前提下, 将射频增益调在最大位置), 如果已检测到干扰, 则应减少射频增益, 以避免因接收机过载而造成干扰。

当用超短波信道接收机作为监测接收机时, 最低限度应将该接收机调到间隔不大于 5MHz 的 36 个频点, 若潜在干扰源是波束型扫描时, 则每个频点的监测时间均应超过波束的扫描周期。

在每次试验过程中, 所有的接收机保护装置都应该使用, 包括安装在接收机上且通常指定供受试接收机用的带通滤波器、陷波器、多路耦合器和匿隐装置。在有些场合由于靠手动调节滤波器和多路耦合器不可能迅速调节一个较宽的频率范围, 可暂时将其旁路。发现干扰后, 再将其重新连接, 如果干扰因此消失, 则不作为干扰, 不需要进一步探测。

(2) 发射设备的选择。发射设备选择时, 不仅应考虑在

每一规定的频段发射, 而且也要考虑到在同频段内每种不同类型的发射设备至少使用一台, 每台发射机和发射天线至少应使用一次。在试验中, 所有干扰发射源应工作在设计最大功率或额定功率状态。

应选择能反映受试船舶典型工作要求的发射机试验频率, 同时应满足发射机、多路耦合器和天线的频率间隔要求。如在发射机工作频率范围内, 至少应在超短波、短波和中波所包括的范围内各选取高、中、低及常用频率各一个作为试验频率, 同时还应选取干扰或危害较大的特殊频率如接收机的中频、视频等。

为了便于识别干扰源, 发射机应该用易于识别的信号进行调制如键控移频 (FSK) 信号、话音信号、电传信号或单音测试信号等。

如果组合发射试验主要使用无线电收发两用机 (电台), 则 75% 的无线电收发两用机应作为发射机工作, 其余 25% 作为监测接收机工作。

对每一台发射机多路耦合器进行专门的试验。试验中, 应将全部发射机连接到多路耦合器上, 并且发射机应工作在最大功率状态, 试验将确定整个发射机—多路耦合器—天线系统的兼容性。

4.8.2.2 试验方法

(1) 根据试验手册并结合有关资料, 了解船舶的总体布置和设计的有关情况; 对所有电子电气设备的数量、型号和位置进行检查, 了解各设备的特性, 熟悉各设备的安装位置和测试部位。

(2) 对舰船上安装的主要电气、电子设备进行仔细分析。分析干扰源设备和敏感设备, 确定干扰源和对应的受干扰设备, 制定电磁干扰矩阵, 并将分析得出的、可能出现的干扰情况作为下一步试验的重点。

(3) 试验应包括在规定类型内的所有干扰源设备和监测这些设备干扰情况的接收机及其他敏感设备。

(4) 按表 9.2-32 分别使 1~6 项的发射设备发射, 监测设备通电工作并检测干扰。特别应注意以下干扰:

表 9.2-32 互干扰试验发射及敏感设备分类

类别	发射设备	监测设备
1	壳体端子辐射发射或电源端子传导发射过大的设备	甚低频至高频接收机等
2	声纳发射机及其他低频发射设备	水声接收设备, 长波通信接收设备、舰船内通及广播设备、自消磁设备
3	射频发射机	雷达、遥控遥测设备、通信接收机、气象接收机、导航设备、舰船内通及广播设备、警戒与指控设备、自消磁设备
4	微波发射设备 (含米波雷达及电子战干扰机)	雷达、遥控遥测设备、通信接收机、气象接收机、导航设备、舰船内通及广播设备、警戒与指控设备、自消磁设备
5	磁场发射设备 (含消磁)	具有阴极射线管的设备、导航设备等
6	上面未提到的各种有源设备 (含电力电子设备)	相应接收机
7	所有干扰源	全舰 (船) 电子、电气设备

1) 当有多部雷达工作时,检查雷达之间是否引起同频异步干扰。

2) 当有多台通信设备同时工作时,确定一定频点,检查多网络通信间的互扰情况,并确定频率分配表。

3) 起动大功率的脉冲负载设备,检查电子数控系统是否受干扰。

4) 起动大功率晶闸管设备,检查声纳系统或船内通信是否受干扰。

5) 当有多部水声设备工作时,检查其互干扰情况。

(5) 当发现干扰后,应逐台关闭发射设备,直到判明干扰来源。重新起动干扰发射源,测量监测设备输出电平,干扰信号电平等相关特征量,并观察和记录受干扰现象。

(6) 在1~6项设备检测完毕后,再进行第7项试验。此项试验最好安排在航行试验阶段进行。

4.8.2.3 干扰等级判别

(1) 轻微。干扰可探测出,但不妨碍有用信号的探测和辨别或随机噪声输出增加不大于3dB,此干扰可不消除。

(2) 中等。妨碍有用信号的探测和辨别或随机噪声输出增加不大于6dB,此干扰应设法消除。

(3) 严重。导致有用信号全部损失或无法辨别或随机噪声增加6dB以上,此干扰必须消除。

4.9 安全裕度试验

4.9.1 试验目的

安全裕度是评定系统电磁兼容性的重要指标之一,GJB 1389A—2005中指出,对于安全性或完成任务有关键影响的系统要求应具有至少6dB的安全裕度;对于需要确保系统安全的电起爆装置,最大不发火激励(MNFS)应具有至少16.5dB的安全裕度。对含有上述分系统、设备的系统,应进行安全裕度试验,以证实是否具有要求的安全裕度。

4.9.2 系统安全裕度试验方法概述

安全裕度试验方法通常有四种。第一种方法是将规定的安全裕度(例如6dB)人为地从敏感阈值上减去,使受试系统对于干扰更为敏感;第二种方法是首先在干扰发生器工作时,测量关键接口点的最大干扰信号,然后再向系统加入同样性质的、但增加了规定安全裕度的信号,如果系统性能没有下降,就验证了安全裕度满足要求;第三种方法是在系统中产生干扰的设备工作情况下,测量关键接口处的传导干扰和所研究设备处的辐射干扰,然后与实验室里测得的敏感度结果相比较,就可以确定安全裕度,只要系统的试验方法和实验室敏感度的试验方法之间具有类似性,这一比较就是正确、有效的;第四种方法是增加干扰源与敏感设备的耦合度,例如用减少收发天线间距离、减小极化损失或减小馈线损耗来增加收发间的耦合,也可以通过从电源线或信号电路中撤除插入损耗已知的滤波器来增加耦合。

4.9.2.1 直接法

完善系统的EMC往往是一个难以达到的目标。因为系统太大以至于不能进行适当且有效的试验,或者说在各项设备安装之前进行试验是不可能的。目前,只有在设备和分系统试验的基础上,即设备的敏感度门限值、关键敏感点、敏感区域、关键敏感频率已知的基础上分析整个系统发射机—接收机对,然后有的放矢地对至关重要的接收机、特别敏感的接收机以及装有易爆电路的武器系统、起动系统内所有可能同时工作的无线电通信设备、雷达、电子战、作战指挥系统等设备,在上述接收机的关键敏感点处测量最大环境电平

值。若该值不满足规定的安全裕度要求(敏感度门限值—最大环境电平 $\leq 6\text{dB}$ 或 20dB),则在关键接收机的关键敏感部位采用相应的EMC措施,直至接收机满足安全裕度要求。

4.9.2.2 间接法

在直接试验条件不成熟或无法实现的场合,可采用间接法如外推法、故障判据法、分析法或这些方法的组合,对系统的EMC安全裕度加以评估。

(1) 外推法。首先,用容易获得的低电平辐射场照射设备,在待测设备路径系统的连接电缆处测出相应频率的感应电流,接着设法算出该设备和系统连接电缆的阻抗特性,以便获得感应电流与辐射场的一一对应关系,再根据场与电流的关系外推放大到包含安全裕度在内的全威胁电平。最后,借助于探头和电缆耦合装置(低频为电感耦合,高频为电容耦合)注入全威胁电平电流。若系统不出现敏感现象可视其为合格,即安全裕度符合要求;反之,为不合格。

(2) 故障判据法。该方法可理解为另一种途径的外推法。上述的外推法意在无法获得大功率发射源及减少对人员及其他设备危害的前提下,以低电平外推至全威胁电平的方法。而本方法是负载的安全状态、安全电流已知的情况下,以标准规定的极限值电平,根据负载出现的状态(脉冲形状、间隔、大小的变化)及相关电流(如发火电流)与正常的安全状态、安全电流(不发火电流)的比值外推其安全裕度。

(3) 分析法。因为系统太大以至于难以进行适当且有效的试验,为此,设法通过分析途径以最佳的费效比实现对系统的EMC评估。该方法是基于各个设备、组件及分系统试验的数据及其环境预测的数据。分析法应考虑一定的冗余量,甚至是30dB的安全裕度。

1) 划分分系统和区分所有的分系统组件,应提供所有分系统组件的EMC性能参数,要求这些组件(分系统和设备)都符合规定的各项发射和敏感度指标。换言之,系统中所有的设备和分系统通过考核试验满足国军标极限值要求。若个别项目不满足要求,应使用系统内EMC程序,根据实船实际环境、位置参数确定该设备处的场强及其他指标是否合格且兼容,或需采用相应措施后兼容。

2) 确定实船电磁环境(EME)。该环境是基于评估有可能遭受来自本舰或编队航行遭受来自其他舰的实际环境这需通过试验或EME程序计算来确定。一旦系统及EME被确定,接着确定发射机(源)—接收机(系统组件)对即E—R对,根据EME程序,分析是否存在干扰情况。若存在不满足干扰极限值及安全裕度要求的情况,应通过人为的详细分析加以考虑。指出存在潜在干扰作用的E—R对,凭借经验用适当的方法加以解决。

4.9.3 电起爆装置安全裕度测量

电起爆装置终端负载是电火工品,大约90%属灼热桥丝式,其发火刺激一般是电流。所以电起爆装置的安全裕度表示为:最大不发火电流除以感应电流的值。因此需要测试系统的感应电流,以确定安全裕度。一般通过测量电火工品桥丝上的温度,依据温度与恒流输入时电流的关系可确定桥丝上的感应电流值。

电起爆装置安全裕度几种测试方法介绍:

(1) 用特殊的蜡或纸作为敏感材料。用蜡或纸把桥丝包裹,依据蜡或纸颜色的变化来判断桥丝的温度。这种方法测量准确性差,结论的可靠性不高。

(2) 利用大电阻的桥丝。用比原来桥丝电阻大的桥丝将原桥丝替换,通过大电阻桥丝的熔化来判别温度。这种方法

测量准确性差,结论的可靠性不高。

(3) 利用热电偶和热敏电阻测量桥丝温度。这种方法在进行直流试验时结果比较理想,但在辐射试验时,误差很大。原因是热敏电偶和热敏电阻以及传送反应温度变化的电信号传输线本身置于强电磁场中,也会由于电磁敏感而生出感应电流,从而使传感器的探头发热。因此,测量的精确度很低。同时这种方法的另一个缺点是系统的响应时间慢。

(4) 利用光纤传感器。光纤传感器可以完全不受电磁辐射的影响,测试系统本身不会引入干扰,而且响应速度比以上方法快得多。

(5) 红外影像法。红外影像法是一种计算机温度测量方法,它通过监控温度分布图(而不是直接接触)来计算目标的温度。

5 屏蔽效能测量

5.1 引言

根据屏蔽理论推导的各种屏蔽效能计算公式所求得的值往往与实际的屏蔽效能有较大差别,因此如何测量实际屏蔽体的屏蔽效能是工程上十分关心的问题。

5.1.1 屏蔽效能测量的基本原理

根据屏蔽效能的定义,只要分别测出同一点屏蔽前后的场强,其比值就是屏蔽效能,通常以分贝表示

$$SE_E(\text{dB}) = 20\lg\left(\frac{E_0}{E_1}\right), SE_H(\text{dB}) = 20\lg\left(\frac{H_0}{H_1}\right) \quad (9.2-25)$$

在屏蔽效能的测量中,根据被测屏蔽体的尺寸、屏蔽的性质选择相应的探头,使用电磁干扰测量仪作测试仪器测量感应电压。

5.1.2 屏蔽效能的分类

按测量对象,屏蔽效能测量可分为屏蔽材料屏蔽效能测量,屏蔽室(舱室)屏蔽效能测量以及屏蔽机箱、屏蔽罩和屏蔽盒屏蔽效能测量。

按屏蔽种类可分有低阻抗磁场的屏蔽效能测量,高阻抗电场的屏蔽效能测量,平面波场屏蔽效能测量。

5.2 低阻抗磁场屏蔽效能测量

5.2.1 亥姆霍兹线圈法

5.2.1.1 测试配置

根据电磁学原理,一对同轴放置的平行线圈,当线圈间距等于一定值(方形线圈为边长的一半,圆形线圈为半径)时,即构成了亥姆霍兹线圈,结构如图9.2-48所示。在这对线圈中通以等值电流,就可在线圈对之间的一定区域内建立起相当均匀的磁场。亥姆霍兹线圈形状的选择,应从安装方便和获得尽可能大的均匀磁场范围的角度考虑,一般采用圆形和方形结构。

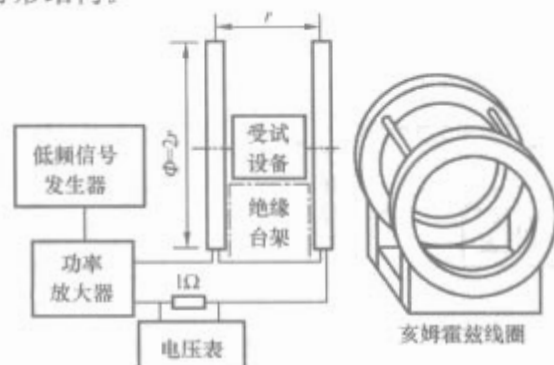


图 9.2-48 亥姆霍兹线圈结构

在高频情况下,一般采用同轴电缆围成线圈,结构如图9.2-49a所示。电缆长度最好小于 $\lambda/10$,所以尺寸不宜太大,只能用于一般小型屏蔽机箱或屏蔽盒(罩)的测量。图9.2-49b是以接地板取代部分同轴电缆, R 为匹配电阻,这种线圈适用于较大尺寸的受试设备。

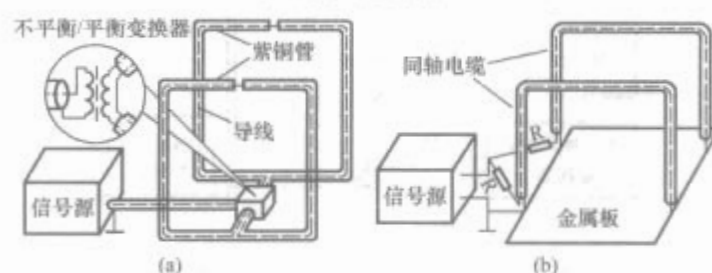


图 9.2-49 高频磁场模拟装置

(a) 同轴电缆围成线圈; (b) 以接地板取代部分同轴电缆

5.2.1.2 磁感应强度计算

当两个线圈串联连接时,通电后在两正方形线圈之间中心点处的磁感应强度为

$$B = \frac{8.53nI}{a} \times 10^5 \quad (\text{pT}) \quad (9.2-26)$$

式中: a 为正方形线圈边长的一半, m ,两线圈间距为 $a/2$; n 为单个线圈的匝数; I 为单个线圈中通过的电流, A 。

对于两个圆形线圈组成的亥姆霍兹线圈,两线圈间距等于线圈半径,中点处的磁感应强度为

$$B = \frac{8\mu_0 nI}{5\sqrt{5}r} \times 10^{12} = \frac{8.99nI}{r} \times 10^5 \quad (\text{pT}) \quad (9.2-27)$$

式中: r 为线圈半径, m ; n 为单个线圈的匝数; I 为单个线圈中通过的电流, A 。

5.2.2 小环法

这种方法主要用于测量屏蔽材料对低阻抗磁场的屏蔽特性,它有下列两种方法:

(1) 当被测材料尺寸够大时,可把被测材料置于同轴(亦可共面)放置的两个小环中间,其布置如图9.2-50所示。发射环和接收环各自用扭绞线与信号源及接收指示仪器相连接,两小环的半径 r 及间距应远小于被测材料的线尺寸,即 $r \ll a$, $r \ll b$ 。

测试方法:在保持信号源输出不变的情况下,置于或移去被测材料,得出接收指示仪器两次分贝读数之差,即为被测材料的屏蔽效能。

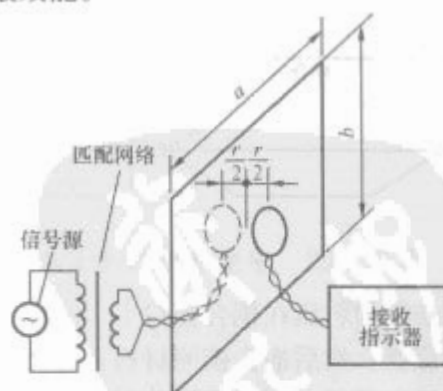


图 9.2-50 小环法测量

(2) 当被测材料尺寸小时,可把它做成一定尺寸的试样,覆盖在屏蔽小室(最好是屏蔽室)的专用开口上,接收环和发射环分别置于屏蔽小室外。小环可同轴放置,两小环间距与上述方法相同。

5.3 高阻抗电场屏蔽效能测量

5.3.1 平行板法

平行板法主要是用来测量小型屏蔽盒或屏蔽机箱的电场

屏蔽效能。高阻抗电场的模拟装置由两块反相馈电的平行板组成,如图 9.2-51 所示。板的尺寸和间距应大于被测屏蔽体外形尺寸 2 倍以上。由于信号源是不平衡输出,因此需接入不平衡/平衡变换器。

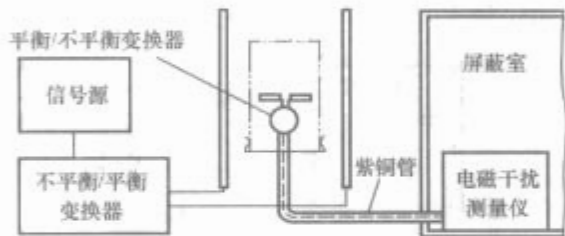


图 9.2-51 高阻抗电场模拟装置

测试中所用的电场测量探头采用短偶极子天线。由于在屏蔽后天线拾场强度很小,直接检波式指示器已不适用,需要电磁干扰测量仪作为检测信号的输出指示。探测偶极子经短导线直接引入平衡/不平衡变换器,然后用同轴电缆(外面再用紫铜管屏蔽)传输到电磁干扰测量仪。测试时,场源装置对周围的辐射严重,电磁干扰测量仪应放在屏蔽室内,只要测出有屏蔽和没有屏蔽时短偶极子上的感应电压值,就可得出屏蔽效能。

5.3.2 平行板线和横电磁波室法

平行板线和横电磁波室法都能产生平面电磁波,所以当检测探头采用短偶极子时,就可对屏蔽盒或屏蔽机箱进行电场屏蔽效能测量。

测试方法把一个短偶极子放入屏蔽盒内,测得屏蔽后的感应电压值,然后除去屏蔽盒测得无屏蔽时的感应电压值。

5.3.3 孪生横电磁波室法

孪生横电磁波室法仅用于屏蔽材料对垂直入射电场的屏蔽效能的测量。

孪生横电磁波室法就是使两个一样大小的横电磁波室合用一个壁面构成,如图 9.2-52 所示。当单个横电磁波室横截面的尺寸为 $18\text{cm} \times 18\text{cm}$ 时,其上限频率约为 1GHz 。图中所示的四个端子配接情况为:端子 1 接信号源,4 接 50Ω 匹配负载,上面小室的端子 2 和 3 是相同的;测量时,测量接收机可接在 2 或 3 任一端子上,不接测量接收机的端子应接上 50Ω 匹配负载。不接端子 2、3 的测量值有差异,端子 2 的输出小于端子 3。



图 9.2-52 孪生横电磁波室法

测量时将被测材料压在耦合窗口上,从端子 2 或 3 上测得有屏蔽时的量值,然后撤去被测材料,保持信号源输出不变,在原来的输出端子上测量无屏蔽时的量值,两次测量之差(分贝读数)即为被测材料的屏蔽效能。测量时接合面的配合质量会影响测量结果,所以要保证表面间的紧密接触。

该测试装置的动态范围除取决于信号源功率及测量接收机的灵敏度外,还与两个横电磁波室的隔离度有关。孪生横电磁波室法的测量准确性可用一块标准镀金膜片进行检定。

5.4 平面波场屏蔽效能测量

5.4.1 带法兰的对接同轴线测量法

由同轴线的场结构可知,这种同轴式测量装置内的电场

与磁场相互正交且垂直于电磁波的传播方向,相当于空间的平面电磁波,所以可用它来测量材料对平面波的屏蔽效能。

图 9.2-53 为带法兰的对接同轴线结构,对接法兰表面有足够的平整度和粗糙度,夹入被测量材料后对两截同轴线进行紧固,保持一定的压紧力。被测材料做成与法兰尺寸相同的圆盘形,比小环法测量要小得多。同轴法测试配置如图 9.2-54 所示,只要信号源及测量仪器适当,可在很宽的频率范围内测试。

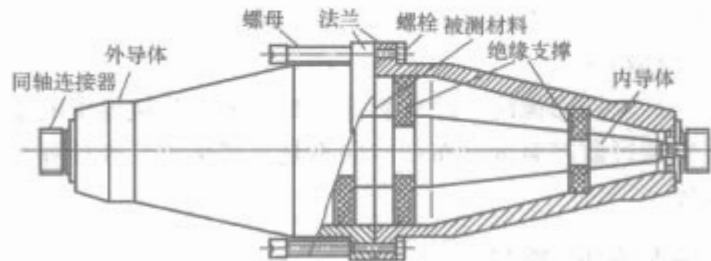


图 9.2-53 带法兰的对接同轴线结构

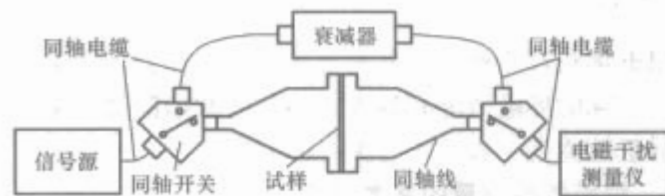


图 9.2-54 同轴线法测试配置

该测量装置的准确性可用一块标准镀金膜片进行检定。标准样品的尺寸为直径 $100^{+0.00}_{-0.05}\text{mm}$,绝缘基板厚度可达 10mm 。其表面电阻为 5Ω ,则标准镀金膜片的屏蔽效能见表 9.2-33。

表 9.2-33 标准镀金膜片的屏蔽效能

频率 (MHz)	30	100	300	1000
屏蔽效能 (dB)	32 ± 3	32 ± 3	32 ± 3	32 ± 3

带法兰的对接同轴线法测量屏蔽效能的动态范围主要取决于信号源功率和电磁干扰测量仪或频谱分析仪的灵敏度,一般可达 100dB 。该测试方法的特点是复现性好,测量速度快,能有效地利用信号源功率,测试的频率范围宽,一般可达 $1 \sim 2\text{GHz}$ 而低端频率几乎不受限制。

5.4.2 时域测量法

图 9.2-55 给出了以时域方法测量材料屏蔽效能的示意图。该系统以脉冲信号发生器作信号源,横电磁波喇叭天线作源天线,接收端采用与源天线相同的喇叭天线,两天线间距为 66cm 。中央放置被测的屏蔽材料。取样示波器用以显示源天线所发射的电磁波在传播途径上受到屏蔽材料的反射和衰减后的波形,并把此时域数据输入计算机。通过计算机进行快速傅里叶变换,把时域数据转化为频域数据。比较源天线与接收天线之间有无屏蔽材料时的信号频域数据,即可求得被测材料在不同频率上的屏蔽效能。

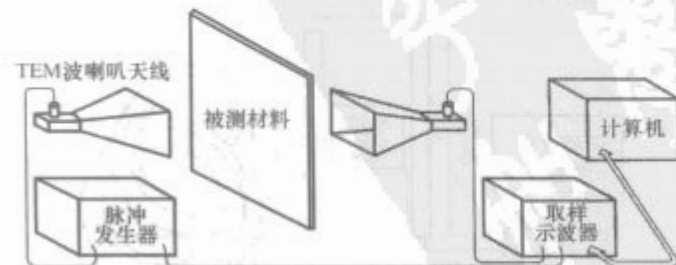


图 9.2-55 时域方法测试材料屏蔽效能系统

对 160MHz 以上的频率而言,系统测得的是平面波场

的屏蔽效能。对低于 160MHz 的频率,则被测材料已处于近场区范围,此时被测材料的存在对源天线本身会产生影响。因此该系统远场条件的测试频率是 200MHz 以上,可测上限频率是 3.5GHz。

该系统进行测试时,需要一个面积很大的试样材料,否则电磁波会绕过试样材料的边缘到达接收天线,造成测量误差。假如试样材料面积较小,则可用一块足够大的薄铜板(例如 2.5m×2.8m)代替,板上开有 7.6cm 的圆孔,把试样材料覆盖孔上进行测量,但这样会引入缝隙泄漏,使测量结果产生误差。

该系统的动态范围仅 50~60dB,所以它不适用于高屏蔽性能材料的测量。若脉冲发生器功率可控,时域测量法也可用于屏蔽室屏蔽效能的测量。

5.5 金属屏蔽舱室屏蔽效能的测量

出于屏蔽室的特点、信号源和探测手段等方面的考虑规定了从低频到微波波段的具体测量方法:在频率为 100Hz~20MHz,用环状天线测量屏蔽室对磁场的屏蔽效能;300MHz~1GHz,用偶极子天线测量屏蔽室对平面波的屏蔽效能。在 20~300MHz 范围内,由于天线尺寸及屏蔽室的空腔谐振等因素的影响,经常会出现异常的测量结果,因此没有规定具体测量方法。如果在此范围内需对屏蔽室进行测试,可移用环天线法或偶极子天线法。

5.5.1 100Hz~20MHz 范围内屏蔽效能测量

小环法测试可用来评价屏蔽室对近区干扰源的屏蔽效能,它特别适用于测量屏蔽室出入口、通风窗、接缝和搭接处的屏蔽效能。其适用的频率范围为 100Hz~20MHz。

(1) 小环法试验配置如图 9.2-56 所示。发射环和接收环直径为 300mm,用 $\phi 4$ mm 的铜线绕 1 匝。在很低的频率范围内,为了使发射环与信号源匹配,应接入合适的输出变压器。接收环指示仪采用与大环法一样的仪器。

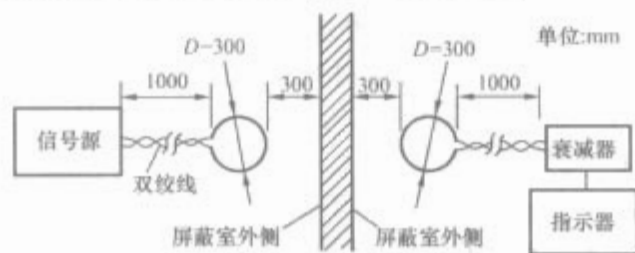


图 9.2-56 小环法试验配置

(2) 接收环和发射环应在同一平面内,并处于同一高度。这时接收环在指示器上的输出值可看作 H_1 。

(3) 无屏蔽层时的模拟场可按下述方法标定。在无屏蔽层介入的条件下,保持发射环与接收环的间距和高度不变,并把信号源调到屏蔽测试时的输出值。这时从接收环测得的是无屏蔽时的磁场 H_0 , H_0 与 H_1 的分贝值之差即为被测对象的屏蔽效能。

5.5.2 300~1000MHz 范围的屏蔽效能测量

本方法在此频段特别适用于高度不超过 3m 的屏蔽室。

(1) 测试频率范围都应选得远高于屏蔽室的最低固有谐振频率。

(2) 测试布置如图 9.2-57 所示,由于此频段内屏蔽室的屏蔽效能较高,因此信号源输出功率应大于 10W。测试中收、发天线均采用偶极子天线。信号源通过不平衡/平衡变换器与半波偶极子发射天线相连接,天线连接电缆应与振子相垂直。

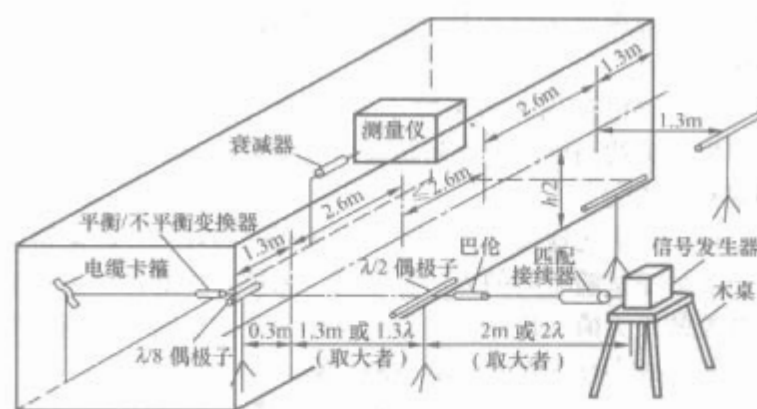


图 9.2-57 300~1000MHz 范围的屏蔽效能测量的测试布置

(3) 接收天线采用 $\lambda/8$ 的电偶极子以减少屏蔽壁的负载效应,它通过匹配器和同轴电缆接到电磁干扰测量仪或测量接收机上。

(4) 考虑到室内驻波的影响,在测量时,接收天线应在水平面内各方向至少移动 $\lambda/4$,垂直方向至少上下移 $h/4$,并且还分别要在垂直和水平两个极化方向上找出屏蔽后的最大场强和最小场强。

(5) 无屏蔽时的场强模拟,接收天线置于屏蔽室外侧,与屏蔽壁的距离应大于 $\lambda/4$ ($d = 0.3$ m)。考虑到可能有驻波存在,测量时接收天线应在水平面内移动 $\lambda/4$,垂直面内移动 $h/4$ 。

(6) 计算屏蔽效能,由于在不同位置 and 不同极化方向进行多次测量,最后应按平均值计算。假如测量了 k 次,场的平均值为

$$E_{av} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k E_n \quad (9.2-28)$$

5.5.3 微波波段的屏蔽效能测量

(1) 测试配置如图 9.2-58 (a) 所示,微波功率信号源应能输出瓦级峰值功率。发射天线采用开口波导,天线远场波束宽度大约是 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。接收天线采用喇叭天线,其远场波束宽度约为 30° 增益大于 10dB。天线输出端通过波导同轴转换器接到屏蔽同轴电缆。功率信号源与开口波导发射天线间应插入隔离器,隔离器正向插入损耗不大于 1dB,而对反射波的抑制不小于 20dB,以保证功率输出恒定不变。场强仪之前接入衰减器,场强仪的灵敏度应优于 -80dBm。

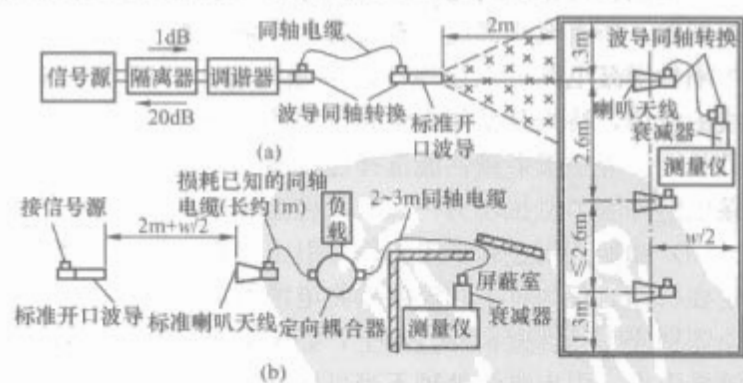


图 9.2-58 微波段测量配置

(a) 微波频段屏蔽效能测量布置;
(b) 模拟无屏蔽室的设备布置

(2) 发射天线中心到受试壁面的距离应为 2m,到拐角的距离为 1.3m,高为 $h/2$ 。天线辐射轴垂直于受试壁面。并使发射天线对准可能的缺陷处,如门缝、板缝、电源滤波器安装板、空气过滤板、通风孔四周部位和同轴电缆的出入口。

(3) 接收喇叭天线的口径面应放在离受试壁面 $\lambda/4$ 的距

离上。接收喇叭天线的极化方式及放置位置以获取最大接收值。

(4) 将壁面划为若干较小的区域, 逐个照射并进行测试。发射天线与屏蔽室之间距离的选择应使小区域上受到的照射相当均匀。

(5) 自由场地模拟。模拟自由场环境的理想方法是物色一个类似于试验空间的无反射环境。测量方法是将一小范围内驻波的最大值和最小值的平均值作为自由空间中远场的度量, 用以减小反射对测量结果的影响。

(6) 屏蔽效能的确定。由有、无屏蔽室检测的平均值计算屏蔽效能。

5.6 标准机箱屏蔽效能的测试

5.6.1 一般要求

船用设备大多是金属机箱机柜, 不同等级的机箱机柜屏蔽效能要求见表 9.2-34。

表 9.2-34 不同等级机箱机柜的屏蔽效能要求

屏蔽效能等级	屏蔽效能最低要求		
	10kHz~30MHz	30~230MHz	230~1000MHz
1	—	20dB	10dB
2	10dB	40dB	30dB
3	30dB	60dB	50dB

1 级机箱机柜为普通机柜, 设计时无需进行专门的电磁兼容性考虑, 适用于对电磁兼容性要求不高的场合。2 级机箱机柜为一般加固机柜, 设计时需进行专门的电磁兼容性考虑, 采用常规的屏蔽加固措施即可满足要求, 适用于对电磁兼容性要求较高的场合。3 级机箱机柜为特殊加固机柜, 设计时必须综合使用多种电磁兼容性加固措施才能满足要求, 适用于电磁环境恶劣或对电磁兼容性要求极其严格的场合。

5.6.2 测试方法

(1) 在测试过程中, 机箱机柜不允许接地。对于高度不小于 1m 的落地式机柜, 机柜和参考地平面之间应至少有 100mm 的绝缘层, 高度小于 1m 的落地式机柜和台式机箱机柜应放在参考地平面上方至少 800mm 的位置。

(2) 测试设备间的连接电缆应尽可能地远离源天线和天线的馈线。所有电缆都应具有良好的屏蔽效能 (必要时应使用半刚性屏蔽电缆或双层编织层屏蔽电缆)。对于连接接收天线的电缆, 特别是暴露在电磁场中的部分, 应尽可能地缩短其长度。应根据射频性能选择连接器, 螺纹式连接器和所连接电缆的转移阻抗较为一致, 其性能优于其他类型。

(3) 如果采用金属电缆将信号引出机箱机柜, 需要通过固定在机箱机柜壁面上的连接器将电缆的屏蔽层在出口处沿整个圆周搭接在机箱机柜壁面上, 如果采用光纤, 应通过截止波导引出。引出电缆处理不当可能导致屏蔽效能的测试值偏低。

(4) 在测试过程中, 任何设备和电磁反射体 (除接地参考面外) 不得在两天线间距和天线高度之间较大值的三倍距离范围之内。

(5) 收、发天线的选择。低频段 (10kHz~30MHz) 的屏蔽效能测试, 发射天线和接收天线均采用环天线; 中频段 (30MHz~1GHz) 的屏蔽效能测试, 发射天线采用球形偶极子发射天线, 球形偶极子发射天线如不含信号源时, 与受试样品外部信号源之间的连接方法不得影响受试样品的屏蔽完整性, 接收天线应根据测试频段选择双锥天线。

(6) 推荐的测试频率点。具体测试频率点由测试双方确定。如果不是在全电波暗室或半电波暗室进行测试, 测试时的电磁发射必须满足无线电频谱管理的相关规定。低频段推荐 10kHz 和 111kHz 两个测试频率点, 中频段采用扫频测试, 30~100MHz 频段内以小于 5MHz 的步长扫描, 100~1000MHz 频段内以小于 50MHz 的步长扫描。

接收天线和发射天线应位于同一平面内 (共面), 两天线的环心连线应垂直于测试点所在壁面。接收天线与机箱机柜内壁相距 70mm, 发射天线与外壁相距 60mm。球形偶极子天线到接收天线间的距离为球形偶极子天线中心到双锥天线中心或对数周期天线顶端的距离, 应在接收天线与接收机之间接入一只 3dB 或 6dB 的衰减器。

5.7 吸波材料的反射率和介质参数测量

在舰船隐身设计、电磁干扰控制以及舰船设备的电磁兼容测试中, 需要用到大量的电磁波吸波材料。根据适用频段的不同, 吸波材料的形式不一样, 性能测量方法也不一样。一般来说, 尖劈状吸波材料具有较宽的工作频段和较好的吸收效果, 而涂敷状吸波材料对微波段有比较好的吸收效果, 铁氧体材料对 30MHz 以下的频段效果比较明显。吸波材料最主要的电参数就是反射率, 同时其相对导电率和导磁率也是材料研制过程中最为关注的参数, 本节主要介绍吸波材料的反射率和介质参数的测量方法。

5.7.1 吸波材料反射率测量

吸波材料的反射率 (反射系数) 由材料表面的入射波和反射波的幅值所决定, 假定吸波材料所在平面为无限大平面, 则反射系数 Γ 定义为

$$\Gamma = E_r / E_i \tag{9.2-29}$$

式中: E_r 为反射电场; E_i 为入射电场。

若用 dB 为单位来表示反射系数, 则可以得到反射率的表达式为

$$\rho = 20 \lg |\Gamma| \tag{9.2-30}$$

ρ 越小, 表示吸波材料的性能越好。

根据频段的不同, 吸波材料的测量方法主要分为低频同轴法、波导法、拱形法三种。

5.7.1.1 低频同轴反射法

低频同轴测试方法适用于在 30~600MHz 的频率范围内对吸波材料的吸波性能进行测试。本测试方法利用终端贴覆有吸波材料的立式方形同轴装置对材料的吸波性能进行测试。低频同轴反射法示意图如图 9.2-59 所示, 测试装置的内、外导体横截面均为正方形, 其中外导体的内表面尺寸为

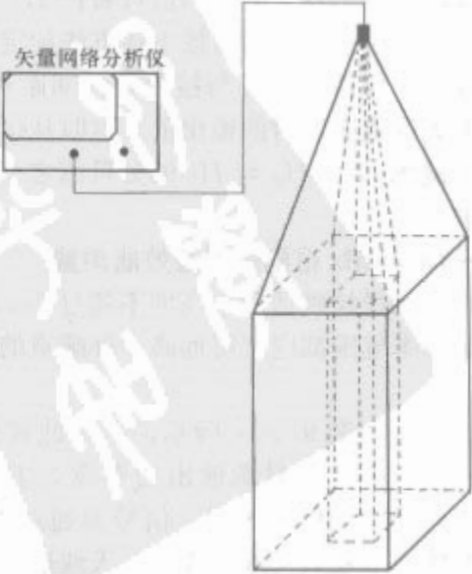


图 9.2-59 低频同轴反射法示意图

内导体外表面尺寸的三倍,被测吸波材料位于同轴装置的底部,装置可同时容纳八块标准试样,由同轴装置输入端口的反射系数得到吸波材料的吸波性能。

测试设备包括矢量网络分析仪、同轴电缆和立式方形同轴测试装置。矢量网络分析仪的频率范围应满足测试频率范围,动态范围优于90dB,输入/输出阻抗为 50Ω 。同轴电缆的特性阻抗也为 50Ω 。立式方形同轴测试装置包括一段等截面方形同轴线、终端短路金属板及装置前端的锥形过渡段。等截面段外导体的内表面尺寸及内导体的外表面尺寸宜为 $1200\text{mm}\times 1200\text{mm}$, $400\text{mm}\times 400\text{mm}$ 。同轴装置的等截面段及锥型过渡段应满足一定的长度要求。

低频同轴反射法的测试步骤如下:

1) 矢量网络分析仪通电预热至少15min,设定测试的频率范围,选择 S_{11} 测量参数。

2) 在连接同轴测试装置的电缆端口上进行 S_{11} 单端口校准。

3) 终端为金属短路板,测量短路同轴线的反射率,应用时域门技术消除由于阻抗失配所引起的反射。测试的起始频率应低于低频端第一个可用频率点,其差值宜为整个测试频段的10%。测得的曲线作为反射参考基准。

4) 在金属短路板上铺设8块标准尺寸的吸波材料。

5) 再次应用时域门技术测得加载吸波材料后的反射率,在针对金属短路板和吸波材料所进行的两次测量中,时域门的设置可以相同或不同。

6) 两次测量所得的反射率之比即为吸波材料的反射率,通常用分贝表示。

5.7.1.2 波导法

波导法适用于在600MHz~1GHz的频率范围内对吸波材料的吸波性能进行测试。波导测试法的典型测试装置如图9.2-60所示。波导一端由一个特别设计的、仅限于 TE_{10} 模的探针激励,另一端由被测吸波材料封闭。能量由探针向吸波材料所在的波导终端传输,其中一部分被材料吸收,其余部分被反射。如果认为波导无损耗,则反射与入射能量在激励端口的比值即等于两部分能量在吸波材料表面处的比值。因此,系统输入端的反射率或驻波比即反映了吸波材料的吸波性能。

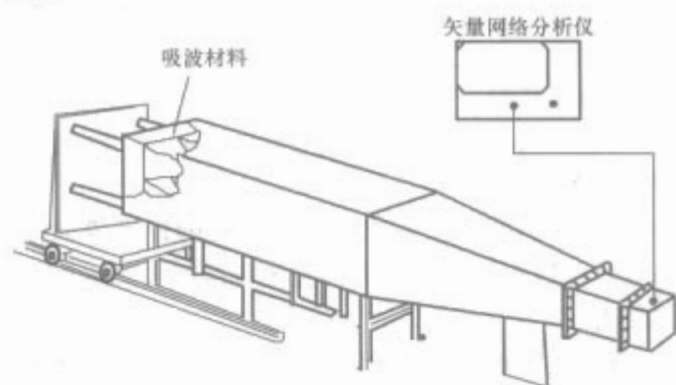


图 9.2-60 波导测试法示意图

波导测试法示意图如图9.2-60所示,波导法的测试设备包括矢量网络分析仪、衰减器、同轴电缆和波导测试装置。测试装置包括以下三部分:一定截面和长度的方形波导管,一块用以安装吸波材料试样的金属板以及装置前端的同轴线一波导转换段。波导管的截面和长度根据测试频率和试样尺寸确定。

波导法的测试步骤如下:

1) 矢量网络分析仪通电预热至少15min,设定测试频率范围和测量参数。

2) 用损耗已知的电缆将波导测试装置与网络分析仪相连,测试装置端口接一个3dB~6dB的衰减器。

3) 对网络分析仪进行 S_{11} 单端口校准。

4) 波导终端以金属板短路,金属板应可靠装夹,确保和波导开口端面紧密接触,也可用射频导电衬垫或指状簧片来尽可能的减少信号泄漏。开启矢量网络分析仪的时域门功能,并将门设置在终端短路板所在的位置,记录测试结果作为吸波材料吸波性能的参考基准。

5) 将被测试样装于金属板上,试样的底层边缘应和波导内表面良好接触,将门设置在波导内吸波材料试样所在的位置。

6) 金属板与金属板装贴吸波材料两种情况下测试电平之比即为吸波材料的反射率。

5.7.1.3 拱形法

拱形法适用于测量吸波材料在1~18GHz、不同的人射角和极化方式下的吸波性能。其测试框图如图9.2-61所示,矢量网络分析仪的输出端与发射天线相连接,激励的信号经被测吸波材料或金属板反射后再由接收天线所接收,并送入与之相连的矢量网络分析仪的输入端。发射天线与接收天线可以在拱形架上独立地移动且均指向圆心。被测试样的反射电平与金属板的反射电平之比即为吸波材料的反射率。接收天线处除了包含吸波材料及金属板的反射信号外,还包括发射、接收天线间的直接耦合、拱形架及周围环境的反射、试样边缘的散射等影响因素,以下统称为乱真干扰。乱真干扰信号与有用信号叠加在一起相消或相长,是造成吸波材料吸波性能测量不确定度的因素。测量过程中应确保乱真干扰电平远低于吸波材料的反射信号电平,必要时应在拱形架与测试台周围放置吸波材料,或者将整个测试装置放于电波暗室中。

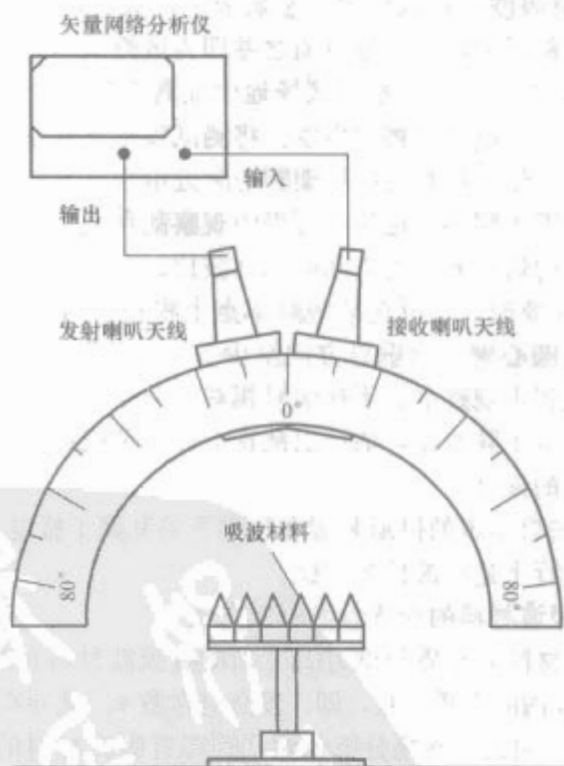


图 9.2-61 拱形测试法示意图

拱形法的测试设备包括拱形架、矢量网络分析仪、发射与接收喇叭天线、安装有金属板的测试台等。设计拱形架时首先应考虑收、发天线之间经由试样反射路径的距离,该距离应使得任一天线处于另一天线的远场区,天线的远场距离由下式确定

$$r_n = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (9.2-31)$$

式中： r_{a} 为从发射天线相位中心经由试样的反射路径到接收天线相位中心的距离，m； D 为测试天线的口径，m； λ 为测试天线在最高工作频率下所对应的波长，m。

拱形架的材料应为非金属材料，通常为木材。矢量网络分析仪的频率范围满足具体测试要求，动态范围优于90dB，输入输出阻抗为50Ω。发射与接收喇叭天线的频率范围、尺寸及波束宽度见表9.2-35。安装有金属板的测试台台面可上下升降，测试台材料为非金属材料，通常为木材，顶面装有金属反射板。

表 9.2-35 发射可接收喇叭天线的
频率范围、尺寸及波束宽度

频率 (GHz)	波长 λ (cm)	天线尺寸 (cm×cm)	波束宽度 (°)	10λ (cm)	$2D^2/\lambda$	天线到平板 的最小距离 (m)
1.1	27.2	56×41	30	272	2.29	1.16
2.0	15.0	56×41	30	150	4.17	2.08
4	7.49	18×25	28	74.9	1.55	0.78
8	3.76	30×20	12	37.6	2.90	2.20
10	3.00	20×15	12	30.0	2.52	1.26
12	2.50	20×15	12	25.0	3.02	1.51
18	1.44	15×13	9	14.4	2.74	1.37

拱形法的测试步骤如下：

1) 矢量网络分析仪通电预热至少15min，设定测试频率范围，选择 S_{21} 测量参数。

2) 矢量网络分析仪进行直通校准，校准通路中应包含连接发射、接收喇叭天线的测试电缆。

3) 测试台顶面铺设金属反射板，矢量网络分析仪的输出、输入端口分别与发射、接收天线相接，记录测试结果并作为参考电平。

4) 将吸波材料试样置于金属板上，吸波材料的反射电平与金属板反射电平的分贝值之差即为被测试样的反射率。

5) 必要时，应判断测试场地中乱真干扰信号电平与金属板反射信号电平的相对强度。将测试频率调整在所关心的频率点上，使金属板在拱形架圆心附近沿垂直方向至少1个波长的范围内移动，在移动过程中观察乱真干扰信号相对于金属板反射信号的自由空间电压驻波比。

6) 必要时，也可在某些频率点上将覆盖有吸波材料的金属板在圆心附近沿垂直方向至少1个波长的范围内移动。在移动过程中观察乱真干扰信号相对于吸波材料反射信号的自由空间电压驻波比，估计出乱真干扰电平相对于吸波材料反射电平的强度。

7) 如果给定的拱形装置和频率下的乱真干扰电平已知，则不必进行上述驻波比的测试。

5.7.2 吸波材料的介质参数测试方法

吸波材料的介质测试方法用以测量吸波材料在30MHz~5GHz频段内的介质参数，即：复介电常数 ϵ 、磁导率 μ 和电导率 σ 。利用矢量网络分析仪测量填充有吸波材料的同轴传输线两端口的 S_{11} 和 S_{21} 参数，进而推算出材料的介质参数 ϵ 、 μ 和 σ 。

5.7.2.1 测试原理

图9.2-62的同轴测试装置以空气填充时，其特性阻抗为50Ω。填充吸波材料后改变了传输线的特性阻抗、反射系数与传输系数。通过对同轴传输线两端口 S 参数的测量可以体现出这种变化规律，从而推算出被测材料的复介电常数与复磁导率。

当测试装置中填充吸波材料时，其 S 参数与装置的反

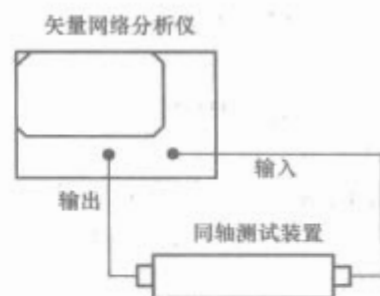


图 9.2-62 吸波材料的介质参数测试原理图

射系数 Γ 以及传输系数 T 的关系为

$$S_{11} = \frac{(1 - T^2)\Gamma}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (9.2-32)$$

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma^2)T}{1 - T^2\Gamma^2} \quad (9.2-33)$$

式中： S_{11} 为同轴测试装置输入端口反射系数； S_{21} 为同轴测试装置正向传输系数； Γ 为空气与被测介质反射面的反射系数； T 为被测介质的传输系数。

空气与被测介质反射面的反射系数 Γ 与介质参数的关系为

$$\Gamma = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} + 1} \quad (9.2-34)$$

式中： Z_s 为填充有吸波材料的同轴传输线特性阻抗，Ω； Z_0 为空气填充的同轴传输线特性阻抗，Ω； ϵ_r 为相对复介电常数； μ_r 为相对复磁导率。

被测介质的传输系数 T 与介质参数的关系为

$$T = \exp(-j\omega\sqrt{\epsilon_r\mu_r}L) = \exp(-j\frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_r\mu_r}L) \quad (9.2-35)$$

式中： ω 为角频率，rad/s； $c=3.0\times10^8$ m/s为光速； L 为试样长度，m。

利用式(9.2-34)和式(9.2-35)可计算相对复介电常数 ϵ_r 与相对复磁导率 μ_r ，电导率的作用 $\sigma/(\omega\epsilon_0)$ 包含在 ϵ_r 的虚部中。

5.7.2.2 测试设备

测试设备包括矢量网络分析仪、同轴测试装置、测试电缆等。矢量网络分析仪的频率范围满足具体测试要求，动态范围优于90dB，输入输出阻抗为50Ω；同轴测试装置的特性阻抗为50Ω。

5.7.2.3 测试步骤

1) 矢量网络分析仪通电预热至少15min，设定测试频率范围和相关参数。

2) 选择合适的校准方式，确定合理的校准界面，对矢量网络分析仪进行校准，在进行直通校准时，加入空气填充的同轴装置。

3) 将上述同轴装置填充被测试样后接入矢量网络分析仪的测试端口，测得 S_{11} 和 S_{21} ，数据应同时包含幅值和相位信息。

4) 根据换算关系，由 S 参数计算出被测试样的复介电常数 ϵ 与复磁导率 μ 。

5) 必要时，可利用对已知材料（如聚四氟乙烯、蒸馏水等）的测量，验证测试系统和计算程序的有效性。

6 滤波器测量

6.1 电磁干扰滤波器安全性能参数的测量

电源EMI滤波器的安全性能参数主要包括漏电流、试

验电压、绝缘电阻和放电电阻等参数,下面分别介绍这些参数特性的测量方法。

6.1.1 漏电流测量

漏电流是电源 EMI 滤波器的一个重要安全性能参数。漏电流是限制电源 EMI 滤波器流经线地(金属外壳)间电容器 C_Y 的电流。只要 EMI 滤波器的外壳与电源系统的安全地线连通,滤波器线地间的漏电流便经电源安全地线构成回路,不会造成危险。当滤波器的地与电源的安全地之间的连接发生故障(如断开)或连接不正确,人体一旦触摸壳体,便构成漏电流的地回路,造成人身伤害。不同的额定电压,漏电流的安全值约为 $0.5 \sim 5.0 \text{ mA}$ 。在设计制造正确无误的 EMI 滤波器中, C_Y 电容器电容量的大小控制了漏电流的大小。

漏电流测量电路如图 9.2-63 所示,测量 EMI 滤波器漏电流步骤如下:

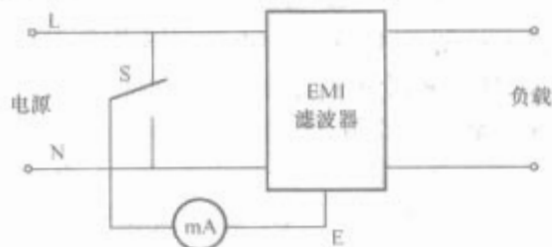


图 9.2-63 漏电流测量电路

(1) EMI 滤波器的负载端不接负载,断开它的 E 端(即当电源端接指定频率的额定电压时,E 端不接电源系统的安全地)。

(2) 在滤波器的接地端 E 与设置在电源 L 和 N 间的单刀双掷开关 S 之间接毫安表,开关 S 分别能与电源端的 L 和 N 相连。

(3) 在滤波器电源端加上该滤波器规定频率的额定电压,当开关 S 与 L 线接通时,从毫安表上读到一个漏电流数值,设为 I_1 ;当开关 S 与 N 线接通,从毫安表上读到另一个漏电流数值,设为 I_2 。一般滤波器中的电容器 C_{Y1} 和 C_{Y2} 的电容量标称值是相同的,但在工程实际中它们不可能完全一样。若用作 C_Y 电容器的电容量标称值有 $\pm 10\%$ 的容差,则 C_{Y1} 和 C_{Y2} 相互间电容量的最大偏差为其标称值的 20% 。所以上述测得的 I_1 不等于 I_2 ,但这两个漏电流的读数都必须小于 EMI 滤波器技术参数规定的漏电流值。

6.1.2 试验电压测量

试验电压是 EMI 滤波器的另一个重要的安全性能参数,它表征了滤波器内电容器 C_X 和 C_Y 承受浪涌电压的能力。电源 EMI 滤波器的试验电压分为线—线间的试验电压和线—地间的试验电压。

电源 EMI 滤波器的负载端不接负载,把技术参数中规定频率的额定电压缓慢地加接到电源端子之间,当电压达到规定的试验电压后,在规定的时间内维持该电压不变。若试验电压加载期间发生击穿现象,则该滤波器的试验电压试验失败。

线—线和线—地试验电压的测量注意事项:

(1) 进行本测量时,工作人员要操作高压电源设备,必须实施可靠的安全措施。操作人员上岗必须经培训,操作必须全神贯注。

(2) 在很短的时间把上千伏的试验电压加到试验端子间,会产生浪涌电流导致损坏试验设备或超过试验电压测量时规定的漏电流值。所以应缓慢加上试验电压,使用某些试验设备的“自动”挡能避免人为操作引起的误差。

(3) 进行线—线间试验电压测量时,因为 EMI 滤波器的线—线间常有的大容量电容器 C_X (通常为 $0.1 \sim 10 \mu\text{F}$) 和泄放电阻 R (约为 $100 \text{ k}\Omega \sim 1 \text{ M}\Omega$) 会出现大的漏电流,在规定这项测试漏电流大小时,应视 C_X 电容量的大小和 R 的阻值来估算。由于 C_X 的电容量和泄放电阻 R 都是有偏差的,应留一定余量。

6.1.3 绝缘电阻测量

部分 EMI 滤波器的安全性能参数用一定工作电压下的绝缘电阻值来表示。世界各国安全标准中规定的绝缘电阻数值都是在 100 V 直流电压下测量的,绝缘电阻测量含线—线和线—地绝缘电阻的测量。

测量 EMI 滤波器的绝缘电阻时,滤波器不接负载。可用国产 CY2679 型绝缘电阻测量仪及类似仪器来进行测量,关于测量注意事项和步骤,遵照测量仪器的规定。

6.1.4 放电电阻测量

放电电阻的一个简易测量方法如图 9.2-64 所示。在滤波器负载端和负载间串入电流表 A。滤波器的额定电压经过 $1:1$ 的隔离变压器加到滤波器的电源端,并设置开关 S。把超低频示波器的输入探头接在 EMI 滤波器电源端,调节示波器,使它的 X 轴扫描时间为 3 s ,Y 轴的满刻度电压读数为 2 倍 EMI 滤波器额定峰值电压。调节滤波器的负载,使电流表 A 上的读数达到滤波器的额定值。然后断开 S,在示波器上能观察到在 50 Hz 交流电压峰值时刻断开 S 的过渡过程曲线。因为开关 S 断开 50 Hz 交流电压的时刻是随机的,应多次重复上述实验,直到在示波器上观察或记录到在 50 Hz 峰值时刻的过渡过程。读出开关 S 断开 1 s 后的电压幅值,来判断 EMI 滤波器放电电阻特性是否满足有关安全性能参数的要求。一般来说,只要在电源 EMI 滤波器内设置有泄放电阻,都能满足 IEC 有关标准对电源 EMI 滤波器放电电阻的要求。



图 9.2-64 放电电阻简易测量方法

6.2 电磁干扰滤波器插入损耗测量

插入损耗是 EMI 滤波器的主要技术参数之一,它反映了滤波器对 EMI 信号抑制能力。

6.2.1 插入损耗的标准测量法

(1) EMI 滤波器插入损耗的标准测量法规定,在 $50 \sim 75 \Omega$ 之间任一阻值的系统内测量它的插入损耗特性。也就是说,滤波器端接输入阻抗为 $50 \sim 75 \Omega$ 之间的任一阻值接收机,在输入端接具有与接收机输入端阻抗完全相同内阻的信号发生器,当然连接器和电缆的阻抗都应与上述系统匹配,在这种特定条件下来测量滤波器插入损耗特性。这种方法又分为空载测量和满载测量。

(2) 由于大多数负载都是随频率在很大范围内变化的阻抗,标准测量法测得 EMI 滤波器的插入损耗与滤波器应用时实现对 EMI 信号的衰减不可能一致。

(3) 对电源 EMI 滤波器,在 $10 \text{ kHz} \sim 30 \text{ MHz}$ 频域内测量它的对称插入损耗特性,在 $10 \text{ kHz} \sim 100 \text{ MHz}$ 测量它的非对称插入损耗特性。对损耗线滤波器,它的插入损耗测量频率范围多为 $10 \text{ kHz} \sim 1 \text{ GHz}$;对用于防信息泄漏目的的滤波

器,通常在 10kHz~10GHz 来测量滤波器的插入损耗。

(4) 被测 EMI 滤波器和抑制元件应按下面规定安装在合适的测试箱内。标准测试箱能把外部电磁耦合对被测 EMI 滤波器的影响,以及某些滤波器输入、输出间电磁耦合的影响减小到最低程度。规定滤波器输入、输出引出端接线长短,是为了控制不同长度连接电线对插入损耗的影响。

(5) 空载和加载条件下电路的所有元器件均应加以屏蔽。对用来抑制非对称干扰信号的滤波器,要测量它的非对称插入损耗;用来抑制对称干扰信号的,要测量它的对称插入损耗。若滤波器既能抑制不对称干扰信号,又能抑制对称干扰信号,如电源 EMI 滤波器,则要同时测量这两种不同的插入损耗。

(6) 如图 9.2-65 所示,在未接入滤波器时,对信号及测试回路进行校准,记录接收机或电压表读数;保持信号源输出不变,接入滤波器,读取接收机或电压表读数,两者的读数之比即为被测滤波器或抑制元件的插入损耗

$$IL = 20\lg(U_{01}/U_{02}) \quad (9.2-36)$$

图 9.2-65 中, G 为信号发生器, T 为 10dB 隔离衰减器, P 为同轴开关, O 为接收机, BO 为被测滤波器或抑制元件, TR 为可调步进校准衰减器, X 和 Y 为相同型号,相同长度的配对电缆,每一路 X 和 Y 配对电缆的总长度应小于最高测试频率的 0.05 个波长。

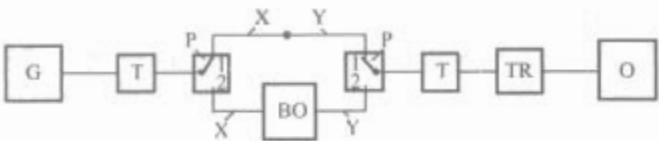


图 9.2-65 滤波器抑制元件的测量电路

(7) 加额定电流/电压的测量及缓冲网络。加额定电流/电压,特别是加额定电流条件下测量 EMI 滤波器插入损耗特性,对检查 EMI 滤波器的质量十分重要,在这种条件下才能发现滤波器设计和制造中的某些缺陷和错误。在含共模线圈的 EMI 滤波器产品中,因使用不合适的材料,磁环上两只对称线圈圈数不一致引起磁环的饱和,或者同名端错接等事故,也能通过上述测量发现。其中 0.1~30MHz 和 30~300MHz 两个频段的缓冲网络等效电路和引出端连接如图 9.2-66 所示,图中端子 1 接信号发生器或接收机,端子 2 接加载的电流源或电压源,端子 3 接被测滤波器或抑制元件。有关的技术参数见表 9.2-36。测量时,将缓冲网络串/并入滤波器输入/输出端及隔离衰减器之间。

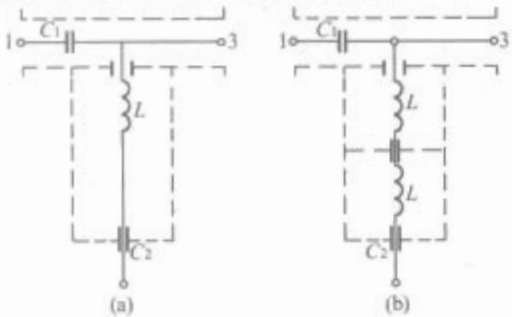


图 9.2-66 30~300MHz 两个频段缓冲网络等效电路和引出端连接

(a) 0.1~30MHz 缓冲网络; (b) 30~300MHz 缓冲网络

表 9.2-36 缓冲网络技术参数

元件	0.1~30MHz	30~300MHz
C ₁	0.1 μF 无感电容器	2nF 无感电容器
C ₂	1 μF/100A 穿心电容器	1 μF/100A 穿心电容器

续表

元件	0.1~30MHz	30~300MHz
L	$L_{1kHz}=1.2mH$ 扼流圈由七节分绕绕组组成,每节绕 60 匝,分 5 层绕制,每节宽约 20mm,节距为 6mm;用直径为 4mm 的纱包电线在 7 根直径为 8mm、长为 200mm 的镍锌铁氧体棒上绕制 镍锌铁氧体的初始导磁率: $\mu_r=200$ 扼流圈长度: 176mm 扼流圈直径: 75mm	$L_{1kHz}=2 \mu H$ 扼流圈是 12 匝的单层绕组;用直径为 3mm 的纱包电线在单根直径为 8mm、长为 42mm 的镍锌铁氧体棒上绕制 镍锌铁氧体的初始导磁率: $\mu_r=200$ 扼流圈长度: 176mm 扼流圈直径: 75mm

6.2.2 插入损耗的现场测量法

对 EMI 滤波器进行现场测量的最好例子,是用电源 EMI 滤波器来抑制 EMC 测试中电源线的传导干扰。以 GJB 151—1997 的规定来测量某设备电源线的传导发射 CE03 为例。先测得没加电源 EMI 滤波器的 CE03,并作记录。把一个电源 EMI 滤波器安装在设备合适的地方,再次测量该设备电源线的 CE03,并记录下来。比较安装电源 EMI 滤波器前后两次 CE03 的测量结果,其差就是电源 EMI 滤波器的实际插入损耗。它与标准测量法在 50Ω 系统测得的插入损耗肯定不相同,这是因为两种测量方法中,滤波器的端接电阻不一样所致。若滤波网络结构不是中心对称的滤波器,还可以调换它的输入和输出端位置,再进行测量比较,会发现调换滤波器的输入和输出端对 EMI 信号的抑制效果不一样。这是因为两种连接方式,造成滤波器端接阻抗产生不同反射结果。

6.2.3 最恶劣条件下测量插入损耗

用标准测量法测量 EMI 滤波器的插入损耗与实际运用时得到对 EMI 信号的衰减值,在某些频率范围往往相差较大,为此,提出在最恶劣条件下测量 EMI 滤波器插入损耗的方法。

6.2.3.1 近似测量法

EMI 滤波器是低通滤波器,大量实验统计数据表明:在 EMI 滤波器低频端的过渡带到它的阻带之间(即频率约为 1~300kHz 的范围内),用 0.1Ω/100Ω 的端接电阻来测量滤波器的插入损耗,比标准测量法用 50Ω/50Ω 端接电阻测得的插入损耗更接近实际。近似测量法的测量电路如图 9.2-67 所示。图中的 22:1 和 1.4:1 是阻抗变换器,当然也可以调换阻抗变换器的位置,按 100Ω/0.1Ω 的配置来测量。



图 9.2-67 近似测量法的测量电路

6.2.3.2 测量估算法

本方法要在测量滤波器插入损耗的每一个频率点上,测量出戴维南阻抗和转移阻抗。

戴维南阻抗测量电路如图 9.2-68 所示,把 EMI 滤波器



图 9.2-68 戴维南阻抗测量电路

的输入端短路，从它的输出端（即负载端）测出它的戴维南阻抗 $R+jX$ 。

按图 9.2-69 方法测量转换阻抗，把信号源加到滤波器的输入端，用高阻抗电压表跨接在信号发生器的输出端，测量加在滤波器输入端上的信号电压。把滤波器的输出端短路，用电流探头卡在短路导线上，测量信号电流大小。算出这时的转换阻抗 Z_t ，则滤波器的最小电压衰减为

$$\alpha V_{\min} = 20\lg(Z_t G_0) \tag{9.2-37}$$

式中： Z_t 为转换阻抗， Ω ； $G_0 = R/(R^2 + X^2)$ 为戴维南导纳， S 。



图 9.2-69 转移阻抗测量电路图

第3章 船舶电磁兼容分析

1 电磁兼容分析的发展

电磁兼容分析是通过理论分析对用电设备或系统的电磁兼容性能进行评估的一种方法,通常应用在系统或设备研制的方案设计阶段和工程研制阶段,目的是为了分析不兼容的薄弱环节,评价系统或设备兼容的安全裕度,为方案修改、防护设计提供依据。同时在研制定型之前通过预测发现干扰问题,可以收到事半功倍的效果,因此电磁兼容分析技术是一项有很高经济效益的工程技术方法。

电磁兼容分析技术在20世纪60年代就开始被人们所重视,但因技术条件的限制,在20世纪90年代以前发展缓慢,没有形成有效的分析软件和理论方法。随着计算机技术的进步,这一状态得到了根本性的改变,相关实用软件相继问世,电磁兼容预测技术前进的步伐大大加快。

产品的电磁兼容性质从开发设计阶段就已基本定型,电磁兼容设计必须贯穿于整个产品的生产、开发全过程,实现要求的电磁兼容性,有赖于可靠的电磁兼容分析与预测,分析与预测的关键在于数学模型的建立和对系统内部和系统之间电磁干扰的计算、分析程序的编制。数学模型包括根据实际电路、布线和参数建立起来的所有骚扰源、传播途径与干扰接收器模型,分析程序应能计算所有可能干扰源通过各种传播途径对每个干扰接收器的影响,并判断这些综合影响是否危害到相应的标准与设计的要求。这些程序的优劣,不仅取决于所能处理的骚扰源和干扰接收器的数目,更取决于其预测的精确性。目前已有许多公司推出了各种电磁兼容预测的商业化软件,电磁兼容分析预测的精确度虽然不很高,但足以对产品(或系统)的设计起到指导作用。这些软件的平台是个人计算机或工作站,所用的数学方法几乎包括了全部可用于电磁场数值计算的方法,得到的结果大多数以三维时域形式表示。

1.1 电磁兼容分析原理

所有的电磁干扰都是由电磁干扰源、对该干扰能量敏感的接收器和将电磁干扰能量传输到接收器的传输通道三个基本要素组合。电磁干扰都遵循电磁干扰三要素原理的规律并且是方位的函数,因而都可以用数学模型来描述。在进行电磁兼容分析计算中,关键的一步是建立干扰源数学模型、传输特性数学模型以及敏感度阈值的数学模型,而数学模型是由实际的物理模型经过简化和近似处理得到的,因此确定便于处理又同实际电磁过程最接近的数学模型是预测分析的准确性和成功率率的保证。

1.1.1 电磁兼容分析方法

由于电磁场的物理性质,电磁兼容分析所建立的数学模型一般是一组微分方程或积分方程,它的解必须根据边界条件(即边界值问题)来确定。电磁场边值问题的求解,归纳起来有解析法(也称严格解析法)、近似法(也称近似解析法)和数值法(也称数字法)三种方法。

1.1.1.1 解析法

解析法是指建立严格的偏微分方程或积分方程并对其求

解的方法,始于19世纪末。当时,电子计算机尚未出现,科学家们利用笔和纸致力于Maxwell方程组解析解的研究。例如著名的Mie级数、Rayleigh散射及Rayleigh导波解、Sommerfeld半无限平面解及Sommerfeld积分以及Debye位等。对偏微分方程进行严格求解的经典方法是分离变量法,对积分方程进行严格求解的方法主要是变换数学法。

解析法的优点是可将解答表示为已知参数的函数,从而计算出精确的结果,这个精确的解答还可以作为近似法和数值法解答的检验标准。正是由于方程建立和求解的严格性,限制了解析法的适用范围,使其在很多情况下得不到有效解,从而大大降低了它的实用性。

1.1.1.2 近似法

近似方法主要活跃于20世纪50年代~70年代,随着电子计算机的出现,近似方法已能分析较复杂形状的物体。一般说来,近似方法分为基于偏微分方程和基于积分方程的两大类。以高频近似为例,几何光学理论(GO)、几何绕射理论(GTD)以及一致性几何绕射理论(UTD)是建立在Maxwell微分方程基础上的,而物理光学法(PO)及物理绕射理论(PTD)则是以积分方程为基础的,这些方法都利用了高频电磁波类似光波的特性。例如,几何光学理论利用费马(Fermat)定理给出了高频渐近解的主项,而几何绕射理论补充了渐近解的高阶项。

高频近似方法的最大优点是不用生成矩阵且计算速度快,从而极大地节省了计算机资源,广泛地应用于电大尺寸物体的辐射场及散射场(包括雷达散射截面)计算。然而,近似方法具有很大的局限性,不能处理非常复杂的物体并且绝大多数情况下只能计算远场。许多实际问题需要知道近区场与内场(或电流)的分布,例如电磁兼容、生物医学、计算机芯片与电路设计等,近似方法仍不能满足很多工程问题的需要。

1.1.1.3 数值法

自从20世纪60年代以来,数值方法由于其强有力的适应性与通用性而得到了蓬勃发展,涌现出很多有效的计算方法。大型计算机的发展为数值方法的发展提供了可靠的保障,并因此取得了前所未有的突破性进展和大量的实用成果。

数值方法的出现,使电磁场问题的分析研究,从解析的经典方法进入到离散系统的数值分析方法,使许多用解析法很难解决的复杂电磁场问题,有可能通过电磁场的计算机辅助分析获得高精度的离散解(数值解),从而使得电磁兼容预测与分析结果更加可靠。由于电子计算机所处理的函数只能是离散函数,而无论在微分方程还是积分方程中,微分或积分所作用的函数都是连续函数,因此数值方法需要将微分方程化为差分方程,或将积分方程中的积分化为有限求和,从而建立代数方程组,它的主要工作量是用电子计算机求解代数方程组。理论上说,数值法可以求解具有任何复杂几何形状的电场边值问题,常见的数值方法有:有时域有限差分法(FDTD)、有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、矩量法(MoM)、奇点展开法和格林函数法。

解析法、近似法和数值法均有自己的优点和缺点,哪一种方法也不可能是十全十美的,只能是比较适用于某种特定的情况。相比之下,在工程电磁场问题的讨论中,数值分析方法是行之有效的,它不仅是建立电磁干扰数学模型的有效方法,也是电磁兼容预测和分析软件算法的基础。

1.1.2 电磁兼容模型描述

电磁干扰模型是对电磁干扰机理理论和实验分析的数学描述,近代关于电磁理论分析方法和角度不断增多,数学模型的内容也不断丰富。从工程的角度出发,应以电磁干扰三要素(干扰源、传输特性和敏感器)理论为依据,注重电磁兼容性模型在预测实践中的可行性。

1.1.2.1 干扰源模型

干扰源的分类方法很多,同电磁兼容性预测技术相关的干扰源模型可分为传导干扰、有意辐射干扰和无意辐射干扰三类。

(1) 传导干扰源是指不带任何信息的电磁噪声对接收器产生的干扰。电路中的传导干扰与辐射干扰性质不同,传导干扰往往用电压和电流的频谱函数表示,其波形常用稳态周期函数和瞬态非周期函数以及随机噪声来描述。

(2) 有意辐射干扰源是指专门发射电磁能量的装置产生的辐射干扰,如雷达和导航设备。有意辐射干扰源模型用来描述各种发射天线发射的电磁波,一般用发射机的基本调制包络特性表示主通道模型,用它的谐波调制包络特性和非谐波辐射特性来表示谐波干扰模型和乱真干扰模型。

(3) 无意辐射干扰源模型是指在完成自身功能的同时附带产生的电磁能量发射,如家电、电动机等。无意辐射干扰源模型用以描述各种高频电路、数字开关电路、电感性瞬变电路等所引起的电磁辐射干扰。工程中通常把发射源简化为电偶极子或磁偶极子的模型,把辐射的电磁波描述为正弦电磁波和指数脉冲波、指数振荡衰减波等。

工程中对干扰模型进行讨论时,为了方便和直观,通常采用时域表示,常用的干扰源时域波形包括单频连续波、脉冲序列波、斜波和阶跃波、梯形单脉冲波、双指数脉冲波、调制波(调幅、调频、开关键控、频移键控)、数字调制波和随机噪声波。

1.1.2.2 传输通道模型

电磁干扰传输是指设备或电路同其他设备或电路之间的电磁联系,这种传输能把一个设备或电路中的电流和电压,通过传输途径在另一个设备或电路里产生相应的电流或电压。因此,传输起着把电磁能量从一个设备或电路传送到另一个设备或电路中的作用。根据电磁干扰传输和耦合途径的分析,工程中较为实用的传输通道数学模型有8种:电阻传导耦合(公共阻抗耦合)模型、电容传导耦合(电场耦合)模型、电感传导耦合(互感耦合)模型、导线对导线感应模型、电磁场对导线的感应耦合模型、天线对天线耦合模型、孔隙泄漏场模型和机壳屏蔽效能模型。

在实际的工程环境中,常常是多个传输通道并存,干扰通道模型很难简单描述,应当具体地逐项分析。8种传输和耦合模型可以在很宽的频率范围内预测分析系统内部的电磁兼容性问题,在评估单个设备或多个设备相互之间的干扰问题时也具有较典型的意义。

1.1.2.3 敏感器模型

与电磁兼容预测密切相关的有两类敏感器:①以接收无线电波为主要功能的接收机;②由模拟数字电路组成的电子设备。

(1) 接收机敏感模型用以描述各种接收天线对辐射干扰

的响应特性。通常用接收机的频率选择特性曲线来表示它对同频道的响应,用中频选择特性的分段线性化曲线来表示非线性效应,包括乱真响应以及交调、互调和谐波响应。对于噪声干扰的响应则用噪声功率公式作为噪声敏感模型。

(2) 在模拟数字电路中,电路中的传导干扰直接作用于模拟数字电路的响应和辐射干扰经过导体感应进入电路间接作用的响应,都可以用敏感度来描述称为敏感度模型。

1) 模拟电路的敏感度模型为

$$S_V = (K/N_V) f(B) \quad (9.3-1)$$

式中: S_V 是以电压表示的模拟电路敏感度; N_V 为热噪声电压; B 为电路的频带宽度; K 为与干扰有关的比例系数; $f(B)$ 为与干扰源特性有关的带宽函数。

2) 数字电路的敏感度模型为

$$S_d = B/N_{di} \quad (9.3-2)$$

式中: S_d 为数字电路的敏感度; N_{di} 为数字电路的最小触发电平。

在电磁干扰耦合的预测模型中,模拟电路或数字电路网络经常由一个等效阻抗来代替。分析敏感器对电磁干扰作用的响应时,通常不考虑相位的影响。一般情况下只计算一阶响应,不考虑高阶效应。

1.1.3 电磁兼容预测分析的步骤和作用

电磁干扰具有复杂性、隐蔽性和随机性,对它本身的分析存在一定困难,而电磁干扰预测看起来就更加无从下手。实际上,多年的研究使电磁场理论已具备了雄厚的理论基础,尽管电磁干扰影响因素多,电磁场分布描述困难,计算工作量繁杂,但还是有其规律可循的。在实际的工作中,只要将复杂系统分析理论应用于电磁干扰分析,有效地进行信息分析、筛选和量化,将系统按步骤分解(可分为系统级、设备级、部件级、元件级四个层次),就能由大到小、由繁到简地进行计算。

1.1.3.1 电磁兼容预测分析步骤

对电磁干扰系统来说,不管它的影响因素多么复杂,仍然要紧紧抓住电磁干扰三要素原理,分析系统各个层次中有几个干扰源、几个敏感器,并对它们的传输通道进行分析。可能干扰源对确定敏感器的分析如图9.3-1所示,系统的电磁兼容分析计算可按下列步骤进行。

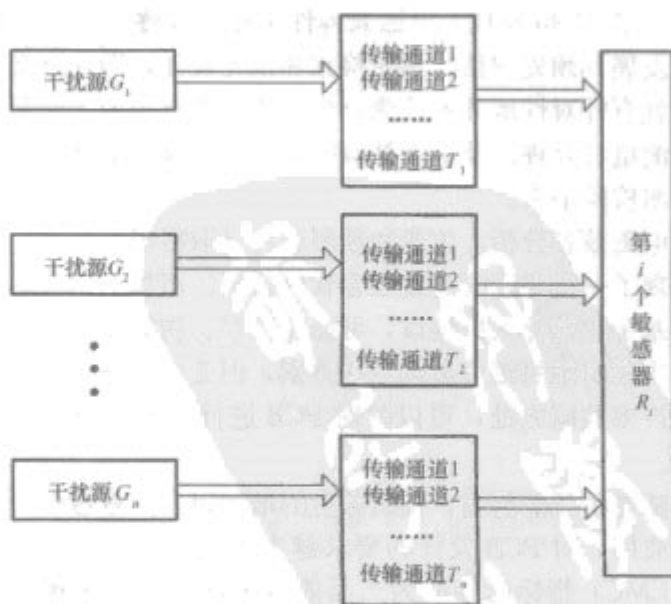


图 9.3-1 可能干扰源对确定敏感器的分析

- (1) 确定一个干扰源 G_i 。
- (2) 确定一个敏感器 R_i 。
- (3) 分析确定 G_i 对 R_i 可能存在的所有传输通道。
- (4) 对所有传输通道逐个分析计算 G_i 传输到 R_i 的干

扰量。

(5) 对所有的干扰源, G_2 、 G_3 、 \dots 、 G_n 分别重复步骤(3)和(4)。

(6) 对敏感器 R_i 接收到的所有电磁干扰量进行综合处理, 判断敏感器在此环境中是否兼容, 并确定对敏感器 R_i 起决定干扰作用的主要干扰源。

上述过程固然能够对系统间或系统内的电磁干扰进行全面细致的分析, 但由于电磁干扰本身固有的复杂性, 量化过程很难完全实现。因此, 在实际的系统分析中, 常常需要对干扰源和干扰途径进行筛选和合并, 即确定起主要作用的干扰源和干扰途径; 并且把性质类似的干扰源或干扰途径合并处理以简化系统的计算, 才能达到满意结果。

1.1.3.2 电磁兼容预测分析的作用

(1) 电磁兼容预测分析在电磁兼容工程中的作用。

1) 在对已有系统测试时, 一般只能测试系统的整体性能, 对系统内部的局部电磁兼容性能往往无能为力。在已知设备电气特性参数(如干扰源特性、敏感器特性)的情况下, 预测和分析系统就能显示出其特有的优越性, 内部所有设备的电磁兼容性和安全性(安全系数)均可以通过预测分析系统做出较为准确的分析和判断。

2) 在设计阶段, 修改某个设备的特性参数(如工作频段、安放方位或电缆走向)可分析比较电磁干扰的变化, 以改进系统的电磁兼容设计。

3) 可以对各种防护设计做出基于满意度的评估计算。

4) 根据实际技术发展水平, 制订干扰极限和敏感度规范。例如, 通过设备已知的敏感度值确定其允许受干扰的极限范围, 或者通过计算已知的各种电磁干扰的综合作用, 确定设备应该具有的敏感度极限, 从而为设备的设计制订出指标。

(2) 应用电磁兼容分析预测软件时, 按照不同的研制阶段, 取得需要的数据即在不同阶段进行分析计算。设备的电气特性可以根据设计、调试、试验和使用的不同阶段可以根据设计数据、相似产品的数据、经验和资料、实验测量数据或规范和标准的数据获得。

1.2 电磁兼容预测常用软件功能介绍

20 世纪 90 年代, 电磁兼容性工作已经逐步从事后检测处理发展到预先评估、预先检验和预先设计, 即在方案设计阶段就有针对性地开展预测分析工作, 把过去用于研制后期试验测量和处理以及返工补救的费用, 安排到加强事前设计和预测检验中来。

电磁兼容分析、仿真和预测软件已取得很大发展, 国内外出现了一批专业的电磁兼容软件公司。市场上销售的软件大多基于可视化人机接口, 可操作性强、功能强大。各种软件所实现功能的细节虽然千差万别, 但工作原理、应用方法却有许多共同之处, 可以针对 PCB 进行有效的电磁场仿真分析。

随着主频的提高, 布线密度的增加以及大量数模混合电路的应用, 对 PCB 设计的要求越来越高, 产品的电磁兼容性(EMC)指标已经成为产品能否走向市场的关键。高速数字和模拟电路的设计需要对信号失真给予特别的关注, 反射、串扰、传输时延、地/电层噪声等可能严重影响设计的功能, 设计人员必须借助一套完整的信号完整性分析工具才能精确预测并消除这些问题。这种工具应该能计算设计中用到的每个元器件的物理特性和电气特性影响及其相互作用, 还必须能从设计的 PCB 中自动提取和建立模型, 并具有能

对实际设计进行动态特性描述的仿真器。针对上述 PCB 及系统设计特点, 软件一般包括信号完整性(SI)、电磁兼容性(EMC/EMI)等仿真工具, 辅以齐全的建模工具, 可与各种常用 CAD 系统紧密结合, 适用于数字电路、模拟电路、数模混合电路的仿真。

1.2.1 电磁干扰(EMI)分析

随着 PCB 功能和速度的增加, 瞬态电流也就增加, 大面积的电源和地平面对就是为了满足这个需要而设计的。但是由于设计的复杂性, 例如多种电源和多种地需要同时使用, 使得地电平面被分割成为有缺陷的平面, 由此可能产生感应噪声(如地弹或瞬态交换噪声), 并影响集成电路的功能和性能。电源和地平面的噪声可以通过对原型产品的测量或由有经验的工程师凭他们的经验来控制, 经常凭经验把去耦电容的容量设定为默认的值。实践中, 去耦电容数量、容量值以及电容的放置位置都与频率有关, 要确定其最佳值是非常困难。为了正确预测电容的有效性, 需要精确考虑瞬态电流和电源实际的供电路径。一旦做到了这一点, 就可以看到电源/地平面上的噪声, 从而通过在适当的地方放置适当容量的电容有效地控制其噪声。

(1) 通过对复杂 PCB 的分析, 获得电源供电点或 IC 的电源脚在一定频率范围内的阻抗特性, 可以分析电容放置位置和电容数值的影响, 对去耦电容的有效性进行评估。

(2) 回流路径分析对 EMI 工程师和 PCB 工程师是独特且非常有用的工具。EMI 的主要原因是共模辐射噪声, 共模辐射噪声由地电平面的过孔、分割、镂空等缺陷造成, 精确仿真共模辐射噪声, 需要功能强大的计算机和电源、地及信号非常精确的非线性器件模型。EMI 工程师的主要工作是找到电流路径或电流环路, 复杂的系统要求 PCB 工程师避免大的回流路径。为了加快产品上市时间, PCB 工程师甚至是 EMI 工程师必须尽快认识到回流路径对其 PCB 的影响。

1.2.2 电磁场仿真

来自系统和微电子线路的电噪声及辐射将严重地影响产品的功能、性能稳定性和上市时间, 在设计开发早期检测、理解并校正这些隐患十分重要。传统的电磁场仿真工具都是采用静态或类似静态的 TEM 分析方法, 而频率变高时, TEM 方法不能精确推算电磁场的寄生繁殖场(如二次场、三次场等), 这些寄生场恰恰严重地影响电路的延时、串扰等。工作频率升高可能会产生更大的辐射噪声, 微小的反馈电流往往会产生很大的辐射冲击。如果不首先获得一个对关注频段的精确电磁场分析方案, 那些至关重要的 EMI 及电磁辐射问题就不能被及早发现并排除。在时钟时序和精密时延非常关键的高频设计中, 是非常理想的工具。

采用“有限时域差分”算法的三维全波电磁场仿真器, 可将二次、三次场等准确仿真出来, 比静态的二维、三维 TEM 方法大大地提高了精度。扩散场、集肤效应、绝缘介质泄漏、反馈电流等都被精确计算在内, 它们往往会严重影响系统的正常工作。其仿真结果可三维显示, 十分有利于工程师查找、理解和排除错源。

基于矩量法的电磁场仿真工具, 可以解决多层介质环境下三维金属结构的电流分布问题。它利用积分方式求解 Maxwell 方程组, 解决电磁波的效应、不连续性效应、耦合效应和辐射效应等问题, 仿真结果包括 S、Y、Z 参数、VWSR、RLC 等效电路、电流分布、近场分布和辐射方向图、方向性、效率和 RCS 等, 是一个非常有用的分析工具, 可以分析非绝缘和复杂介质结构的问题, 在 EMI 及 EMC 方

面具有广泛的应用。

2 电磁骚扰源

2.1 电磁骚扰与电磁干扰

根据 GB/T 4365—1995 的定义,电磁骚扰指“任何可能引起装置、设备或系统性能降低或对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象”。电磁干扰是“电磁骚扰引起的设备、传输通道或系统性能的下降”。

电磁骚扰仅仅是电磁现象,是客观存在的一种物理现象,它可能引起降级或损害,但不一定形成后果。而电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。

2.2 骚扰源的基本分类

电磁骚扰包括电磁噪声、无用信号以及媒介自身的变化,按骚扰源的种类,可分为自然骚扰源与人为骚扰源。

2.2.1 自然骚扰源

自然骚扰源是指自然界固有的与人的活动无关的电磁干扰现象,自然骚扰源主要来源于以下几种自然现象。

(1) 来自银河系的电磁噪声。在银河系中,一些天体或天体附近会产生大量的电磁辐射,称为射电星,这些天体就是很强的电磁噪声源,但来自银河系的电磁噪声一般不会干扰地球表面的装置设备或系统。

(2) 来自太阳系的电磁骚扰。太阳系也常常发生强烈的电磁现象,太阳及太阳系的行星都会发出辐射,产生强烈的电磁干扰。例如太阳黑子爆发、日辉等都会产生严重的电磁干扰,严重的太阳黑子爆发会导致地球表面的磁暴,造成地球上的无线通信阻断。这些电磁现象干扰的对象主要是通过卫星传送的通信和广播。

(3) 来自大气层的电磁骚扰。闪电是大气层中频繁产生的、强烈的电磁骚扰源,可分为云闪(云间放电)和地闪(云对大地放电)两种。由于云闪的高度在数千米至万米,因此危害远小于地闪。一般地闪都是多次放电的,第一次放电的发展速度为 $(1.5\sim 14)$ 万 km/s,放电时间约 $50\sim 100\ \mu\text{s}$,电流可达 $100\sim 200\text{ kA}$,第二次放电一般不超过 30 kA ,这样大的电流无论是直接形成的电磁噪声或是在附近导线上感应出的浪涌都是很强的电磁骚扰源,其频谱可以包含由低频起到甚高频的全部频率。

大气层中的其他自然现象也会形成电磁骚扰源,如沙暴会由于干燥的沙粒互相摩擦而携带电荷,并不断的放电而形成电磁噪声。

(4) 热噪声。热噪声是指处于一定热力学状态下的导体中所出现的无规则电起伏,它是由导体中自由电子的无规则运动引起的。热噪声的平均值和瞬时值都无法测量,但其均方值可以确定。其他气体放电噪声、有源器件(如真空管、晶体管)散弹噪声也有类似性质。

(5) 沉积静电等其他骚扰源。沉积静电是一种重要的自然噪声源,它引起的电磁干扰会直接影响飞行器的效能和安全。飞行器表面静电荷累积过程和由此引起的电晕放电、流光放电产生宽带射频噪声,噪声的频谱分布在几 Hz~几 GHz 的范围内。

2.2.2 人为骚扰源

人为骚扰源是指由于人类的工业和社会活动所产生的电磁干扰,常见的人为骚扰源有以下几种。

(1) 高压电力系统。包括架空高压送电线路和高压设备,其电磁噪声主要来自于导线表面对空气的电晕放电、绝

缘子的非正常放电、接触不良处的火花等。

(2) 电牵引系统。包括电气化铁道、轻轨铁道、城市无轨电车及其他各种类型的电动车等,这类系统中不仅机车内部的电力电子设备会产生干扰,同时当机车运动时,其受电弓在电网导线上滑动,也会产生很强的电磁噪声。

(3) 内燃机点火系统。各种内燃机的点火系统都是很强的电磁骚扰源。点火时产生前沿很陡的电脉冲,宽度为 $1\text{ ns}\sim$ 数百 ns,具有很宽的频谱,在 $30\sim 300\text{ MHz}$ 的频带内干扰最强。这些电脉冲会沿着车内的高电压导线或“分电盘”等部件传导并向外辐射。

(4) 通信、广播、定位等大功率无线电发射设备。这些大功率设备本身就是通过发射电磁能量来传送信息的,本系统的有用信号对于其他系统就可能是干扰信号。由于这些设备的发射功率很强,因此很容易对周围装置、设备或系统造成干扰,也有可能对周围的生物体产生危害。

(5) 工科医射频设备。工科医设备,是指有意产生无线电频率能量,对其加以利用并不希望发射的设备。

工业设备包括感应加热设备中的高频电炉、高频热合机及高频焊接等。医疗设备则包括从短波到微波的各种电疗设备以及高频手术刀等,主要影响医院内电子医疗设备的正常工作。科研用射频设备在我国还不是主要的电磁骚扰源。

(6) 家用电器、电动工具与电气照明。这些产品种类繁多,电磁干扰产生的原因也很复杂。如设备内部的电动机、开关、继电器在工作时会形成火花放电,气体放电灯利用辉光放电发光,这些现象都会产生大量的电磁噪声。

(7) 信息技术设备。信息技术设备的工作特点是两电平数字信号。其典型的代表是计算机,随着计算机时钟频率的不断提高,其电磁发射的频谱已高达数百 MHz 以至于 GHz。

(8) 核电磁脉冲。对原子弹破坏性研究的初期,认为其主要破坏是由于光辐射、热辐射、冲击波与放射性沾染,但后来发现伴随着核爆炸还会产生强烈的核电磁脉冲。核电磁脉冲可能感应至设备、装置的导线上,并且传输至器件上使其失效。

(9) 电力电子系统。电力电子技术的高电压、大电流及高频化的实现,使其应用越来越广泛,目前广泛应用的有源功率因数补偿、变频调速、开关电源等都利用了电力电子技术。但电力电子系统同时也带来了负面影响,除导致交流电源系统功率因数下降、谐波增加等,还是一个电磁噪声发射源,此电磁噪声的频谱会远远高出各次谐波的频率。

2.3 自然骚扰源的特性和分析

自然骚扰源的噪声统计特性变化很大,包括频谱平坦的高斯噪声到偶尔发生的脉冲噪声。有些自然骚扰源的统计参数基本与时间无关,而有些骚扰源的特性则随时间变化。在随时间变化的情况下,可给出随时间(天/年/季节)的变化情况。

由于自然骚扰源是环境中固有的,所以至少应考虑落在设备工作频率范围内的所有自然干扰。如果模拟最严酷自然环境条件系统不受影响,就不必再进行详细的概率分析,但如果设备敏感,则必须进行概率分析。此时把指定分布特性作为每一个独立变量的函数,然后用数理统计方法计算系统对干扰环境变化的响应,并建立系统对自然干扰的敏感度极限。

2.3.1 天电噪声

天电噪声是雷暴时放电所产生的大气噪声,是 30 MHz

以下主要的自然无线电噪声源,对20MHz以下的无线电通信影响很大。天电噪声随时间变化很大,其短期特性不能用简单的随机过程来表示,天电噪声模型包括远处雷电效应和当地雷电效应。

(1) 对于远处的雷电,雷电波频谱的每一频率分量,经远距离的传输可用低电平高斯噪声来表示。但实际接收机带宽不可能无限小,得到的远处雷电噪声模型不是高斯噪声,其概率分布形状取决于接收机带宽。在各个频率上,雷电噪声包络一阶概率分布依赖于包络均方根值和平均值的比 V_d ;对于高斯噪声,包络的瞬时值具有瑞利概率密度 $V_d=1.05\text{dB}$ 。

(2) 当接收机位于雷雨区附近时,闪电产生的脉冲场将超过接收机所能承受的设计电平。通常雷电闪光包括3~4次局部放电,发生雷电时,在放电区会产生极高的电场。通常雷击之间的脉冲间隔比较长,每个脉冲是离散出现的,但在雷雨期间不同地方同时产生的放电脉冲也可能重叠在一起,因此在接收机接收到的脉冲是具有随机振幅的准随机脉冲群。

天电噪声的强度随时间缓慢变化,并随地理位置变化,一般采用覆盖地球的等温线(也称等噪声温度线)表示。等温线用噪声系数表示

$$F_n = 20\lg(T_n/T_0) \quad (9.3-3)$$

式中: F_n 为噪声系数; T_n 为位于导电性很好的地面上的短垂直天线温度,K; $T_0=228\text{K}$ 为基准温度。噪声系数可以转换为1kHz带宽上的场强

$$E = F_n - 65.5 + 20\lg(f) \quad (9.3-4)$$

式中: f 为频率,MHz; E 为电场强度,dBμV/m。

2.3.2 地球外噪声

地球外噪声即来自地球外层空间的噪声,主要噪声源包括太阳、天空背景辐射和分布在银河系的射电星体等。图9.3-2所示为关于太阳、行星和恒星噪声的综合数据。

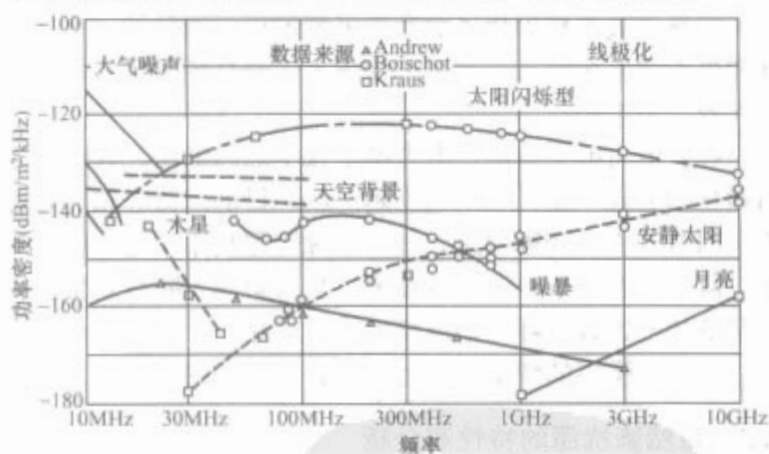


图 9.3-2 太阳、行星和恒星噪声

2.3.3 电子噪声

电子噪声主要来自设备内部的元器件。常见的电子噪声源包括热噪声、散弹噪声和分配噪声等。

(1) 热噪声发生于一切损耗过程中,热噪声具有极宽的频谱,能量随温度而变化,温度越低,噪声越小。电阻两端的开路噪声电压为高斯过程,其功率谱密度基本上不随频率变化,可表示为

$$N_v(f) = 4kRT \quad (9.3-5)$$

式中: N_v 为电阻热噪声功率谱密度, V^2/Hz ; k 为波尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$; T 为绝对温度,K; R 为电阻, Ω 。

若电阻与一无源网络相接,该网络电压转移函数为

$H(f)$,有效带宽 B_e 为

$$B_e = \frac{1}{|H(f_0)|^2} \int_0^\infty |H(f)|^2 df \quad (9.3-6)$$

式中: f_0 是 $H(f)$ 的中心频率。则网络输出电压的均方值为

$$E(V_n^2) = 4kRTB_e |H(f_0)|^2 \quad (9.3-7)$$

(2) 散弹噪声出现于遵循泊松分布的任何粒子流过程中,例如半导体中的电子和空穴流以及真空管的电子流。在这些器件中载流子彼此独立,在各个短暂的瞬间,它们都是不连续、不规则的,从而使电流由一系列随机脉冲组成。晶体二极管和真空二极管散弹噪声的功率谱密度一般可用下式表示

$$N_i(f) = 2eI \quad (9.3-8)$$

式中: N_i 为二极管散弹噪声功率谱密度, A^2/Hz ; $e=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$,为电子电荷; I 为板极平均电流,A。

若这种骚扰源向一无噪声网络供电,设网络的电流转移函数为 $H(f)$,则该网络输出电流均方值为

$$E(I_n^2) = \int_0^\infty 2eI |H(f)|^2 df = 2eIB_e |H(f_0)|^2 \quad (9.3-9)$$

(3) 电流分配噪声发生在晶体管和多集电极电子管中。在晶体管中由于载流子复合的数量时多时少,导致集电极电流随机起伏引起分配噪声。在多集电极电子管中,分配噪声是由于各电极之间电流分配的随机起伏所造成。

2.4 人为骚扰源的分析

人为骚扰源可以分为连续波干扰、开关瞬态和非线性等几类,在分析和处理方法上也各有不同。

2.4.1 连续波干扰

连续波干扰的波形主要包括下列两种。

(1) 纯的或用窄频带信号调制的正弦波。

(2) 高重复频率的周期性信号,它的各次谐波间隔大于接收机带宽,使接收机带宽内不可能同时接收到两个或两个以上的谐波。

这类干扰信号的能量集中在离散频率上,其估计和估计方法与宽带干扰完全不同。连续正弦波以单一频率存在,其频谱为一条线。当正弦波受调制时,频谱由载频和上下边频带组成。重复频率高的周期性信号频谱是由间隔较大的离散谱线组成。

频率、功率和功能不同的发射机具有不同的频谱特性,即使是同一类别的发射机,由于采用不同的线路、结构和制造工艺,其频谱分布也相差较大,所以在系统设计时,一般用发射机统计特性或军标极限值来估计该发射机对环境的影响。

2.4.2 瞬态干扰源

人为宽带干扰主要起因于瞬态现象。手动开关和继电器的单次转换、旋转机电设备、半导体设备、荧光灯等照明设备的重复性转换开关动作都会引起瞬态干扰,并有时在触点之间引起电弧。

(1) 开关转换的简化电路如图9.3-3所示,实际上开关电路触点动作并不是瞬间完成的,所以开关闭合时负载电阻两端的电压按指数规律上升

$$V(t) = V(1 - e^{-t/\tau}) \quad (9.3-10)$$

式中: $V(t)$ 为 t 时刻负载电阻两端的电压;时间常数 $\tau=L/R$, L 为电感, R 为电阻; V 为负载的终值电压。

式(9.3-10)电压对应的频谱幅值为

$$S(f) = \frac{V}{\pi f \sqrt{1 + (2\pi\tau)^2}} \quad (9.3-11)$$

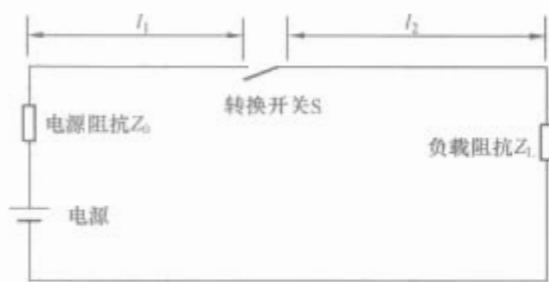


图 9.3-3 简化的开关转换电路

在分析时，为简化起见可以用线性上升代替指数上升的波形，这种线性近似波形的频谱包络为

$$S_s(f) = \frac{V}{\pi f} \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau}$$
 (9.3-12)

式中：S_s为频谱幅度；τ为上升时间；V为终值电压；f为频率。

(2) 开关断开时，电流从一定值迅速减小到零，由于 di/dt 较大，电路电感两端会产生幅值很高的瞬时电压脉冲。此高电压在开关触点间形成电弧，从而使电流继续流动。

图 9.3-4 画出了典型的开关转换瞬态波形，整个转换瞬态电压实际上是由一群脉冲组成，对于干扰发射频谱的影响是使电弧振荡频率上的频谱幅度增大。电磁开关的电磁干扰频谱见表 9.3-1。

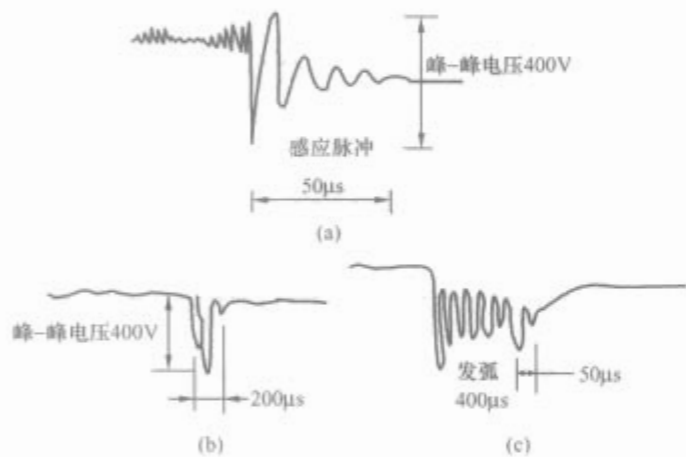


图 9.3-4 典型的开关转换瞬态波形

表 9.3-1 电磁开关的电磁干扰频谱

开关类型	电磁干扰频率范围	干扰形式
电源自锁继电器	15kHz~400MHz	辐射
	1~25MHz	传导（线圈线路）
	30kHz~25MHz	传导（触点线路）
电源切换继电器	15kHz~400MHz	辐射
	150kHz~25MHz	传导
转换继电器	130kHz~60MHz	辐射
	600kHz~12MHz	振荡传导（线圈线路）
	87~150kHz	振荡传导（线圈线路）
电磁阀	1~8kHz	传导
电源接触器	150kHz~25MHz	传导
线圈控制的同轴开关	150kHz 振荡	振荡传导（线圈线路）

2.4.3 非线性现象

几乎所有的电磁干扰现象都与非线性有关。非线性现象有非线性失真、开关瞬态、调制、混频等几种类型。非线性失真情况可以从输入、输出关系曲线图上估计，对于调制和混频等则需要结合载波信号和调制信号的幅值进行分析。

3 电磁干扰耦合途径

3.1 噪声干扰的途径

电磁兼容问题实际上是电磁装置或系统与其他系统之间无意的相互作用，这种相互影响可以用“耦合”来描述，即一个系统对另一个系统的耦合，实现骚扰源到敏感设备之间能量的传递。

图 9.3-5 为噪声经辐射路径或实际导电路径造成电磁干扰的主要传播路径。图 9.3-5 (a) 绘出三类不同的辐射干扰途径，第一种为天线设备辐射的电磁能量，第二种由内含产生噪声元器件或电路的机壳所辐射的电磁噪声，第三种为电缆或传导线间的串扰。三类干扰源将产生九种不同的组合，即天线对天线、天线对机壳、天线对传导线、机壳对天线、机壳对机壳、机壳对传导线、传导线对天线、传导线对机壳、传导线对传导线。图 9.3-5 (b) 所示为导线引起干扰的可能途径，包括干扰源直接经实际导线干扰附近的电气设备。

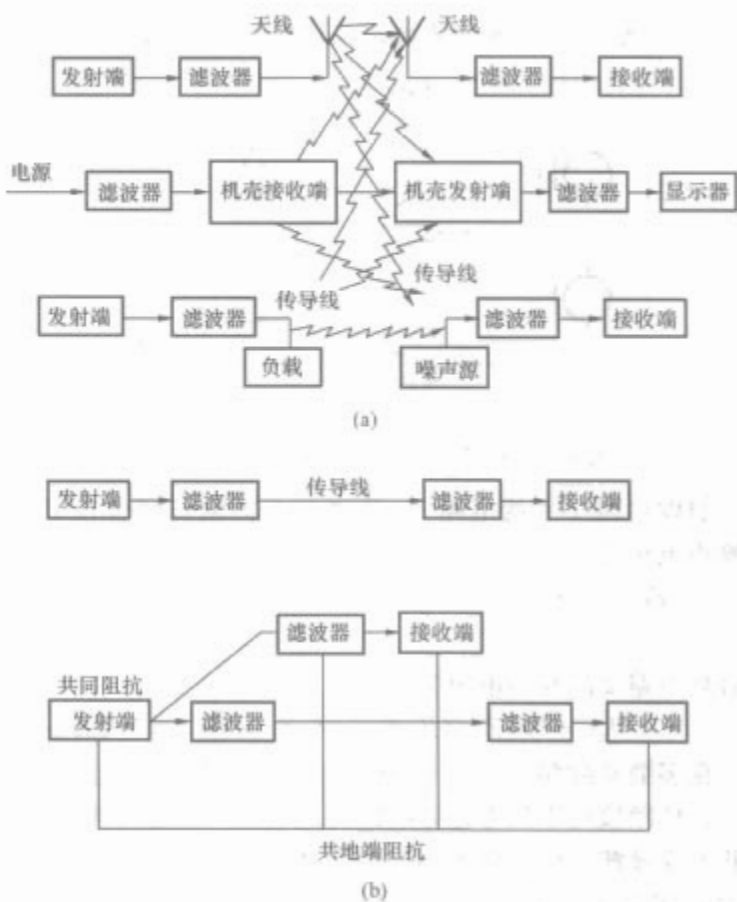


图 9.3-5 电磁干扰的主要传播路径
(a) 天线-外壳-传导线辐射路径；(b) 直接传导路径

在九种电磁干扰途径中，一般有三种途径所产生的干扰较为严重。

(1) 如果设备含天线且处理的信号是以载波输送，则天线对天线的辐射路径为主要的干扰路径。

(2) 若干扰源含天线设备，而受害端或接收端并未拥有天线设备，则主要干扰途径为天线对传导线。

(3) 若设备间的位置相当靠近且导线间的间隔很小，则主要干扰路径为传导线对传导线。

噪声能量的传递可分为传导和辐射两种方式。从设备接受干扰的角度来看，电磁骚扰的传播途径也可分为传导耦合和辐射耦合。传导耦合是指干扰源的电磁能量以电压或电流的形式通过电路连接耦合到敏感电路，主要有导线直接传导耦合和公共地阻抗耦合。辐射耦合是指干扰能量通过空间电

磁波的形式传播到敏感设备中产生干扰，主要有电容性耦合、电感性耦合、导线对导线串扰耦合、场对导线耦合几种形式。

3.2 耦合路径的数学模型

3.2.1 导线直接传导耦合

噪声可以从一个电路直接耦合到另一个电路，当两个电路如图 9.3-6 相连时就会发生典型的公共阻抗耦合。在计算传导耦合时，如忽略互连阻抗 Z_{11} 和 Z_{12} ，将 Z_{1N} 和 Z_{2N} 的并联记为 Z_C ，并认为 Z_{1P} 和 Z_{2P} 远小于负载阻抗 Z_1 和 Z_2 ，可得到如图 9.3-7 所示等效电路。

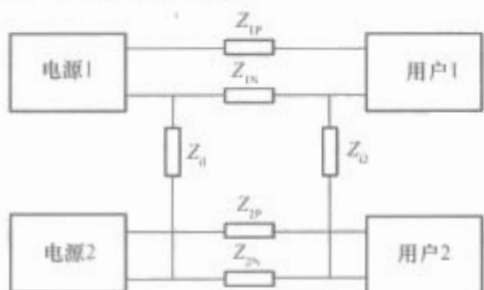


图 9.3-6 两个电路之间的传导噪声耦合

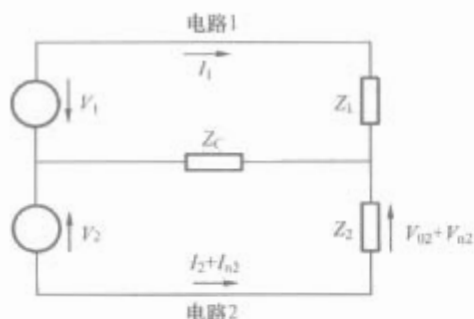


图 9.3-7 计算传导噪声耦合的等效电路

假设电路 1 干扰电路 2，则通过公共阻抗耦合在 Z_2 上的噪声电压为

$$V_{n2} = I_1 Z_C Z_2 / (Z_C + Z_2) = V_1 Z_C Z_2 / (Z_1 Z_C + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_C) \quad (9.3-13)$$

耦合到电路 2 的噪声电流为

$$I_{n2} = V_1 Z_C / (Z_1 Z_C + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_C) \quad (9.3-14)$$

在多数实际情况下，噪声耦合阻抗是导线的电阻和电感。在低频段可以只考虑导线的直流电阻，但在高频段由于集肤效应导线的电阻将增加。对于直径为 d (mm)，直流电阻为 R_0 的实心圆铜导线，在频率 f (Hz) 上的交流电阻，当 $d\sqrt{f} > 300$ 时可近似为

$$R = R_0 (0.25 + 0.00376d\sqrt{f}) \quad (9.3-15)$$

导线的自电感对电子电路的噪声和暂态行为特性有较大影响，自电感包括内部和外部两部分。单位长度圆导线的内部电感约为 $0.5 \mu\text{H}/\text{m}$ ，与导线直径无关。当导线间距较大时，与外电感相比内电感可以忽略。如果导线距地平面高度大于导线直径的 3 倍，圆导线的外电感近似为

$$L_s = [\mu_0 l \ln(4a/d)] / (2\pi) \quad (9.3-16)$$

式中： a 为导线距地面高度； d 为导线直径； l 为导线长度。

3.2.2 公共地阻抗耦合

共地耦合的干扰路径是通过电路接地端公用阻抗产生的，共用接地阻抗产生的电磁干扰如图 9.3-8 所示，地电流 I_g 在共用接地阻抗上形成共模噪声电压 V_i 。此电压如同一个电磁干扰源，在环路 ABCDEFGHA 和 ABCIJFGHA 产生噪声电流，噪声电流会在放大器或逻辑电路的输入端产生电位差而形成电磁干扰。

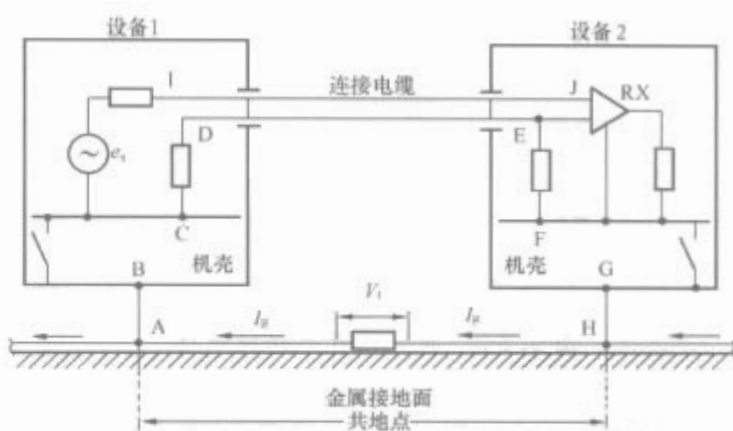


图 9.3-8 共用接地阻抗产生的电磁干扰

图 9.3-8 中两个设备的接地阻抗可以是金属接地面（如船舶的金属机壳）、安全地线，也可能是数个放大器或逻辑电路的共同接地环路。共用地阻抗的地电流可能来源于如图 9.3-9 所示的独立信号源，包括电源中性线上的电流和接地负载的电流

$$I_g = V_g / (Z_g + Z_L + Z_W + Z_C) \quad (9.3-17)$$

式中： $V_g = V_{gi} + V_{gu}$ 为激励源电压， V_{gi} 为直流电源或 50/60/400Hz 的电源， V_{gu} 为其他频率的电磁干扰源，包括电力线上的谐波； Z_g 为电源的内阻抗； Z_L 为负载阻抗； Z_W 为电源至负载间导线的阻抗； Z_C 为接地面的阻抗。

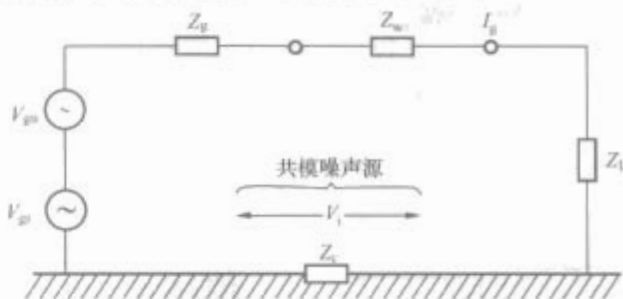


图 9.3-9 信号源产生的地电流

仅考虑直流或 50/60/400Hz 时，式 (9.3-17) 可简化为

$$I_{gi} \approx V_{gi} / (Z_L + Z_W) \quad (9.3-18)$$

但在计算由电源谐波引起的高频地电流干扰时，不能使用式 (9.3-18)，而需用式 (9.3-17) 进行详细的分析。虽然接地面的直流电阻值相当低，但其高频阻抗相当高，此高频阻抗是引起电磁干扰的一个主要因素。

当接地点距离小于信号的波长 λ 时，金属接地面的阻抗可用下式计算

$$Z_C = (R_{DC} + jX_{RF}) [1 + \tan(2\pi d/\lambda)] \quad (9.3-19)$$

式中： R_{DC} 为直流电阻； X_{RF} 为射频阻抗。计算公式为

$$R_{DC} = \frac{17.2d}{\sigma_r w t} \times 10^{-6} \Omega \quad (9.3-20)$$

$$X_{RF} = \frac{d}{w} \frac{369 \sqrt{\mu_r f / \sigma_r}}{1 - e^{-t/\delta}} \times 10^{-9} \Omega \quad (9.3-21)$$

式中： σ_r 为相对于铜的电导率； μ_r 为相对于铜的磁导率； d 为两接地点的距离，mm； w 为金属地平面的宽度，mm； t 为金属地平面的厚度，mm； f 为频率，Hz； $\delta = 66 (f\mu_r \sigma_r)^{-1/2}$ 为集肤深度，mm。

3.2.3 电容性耦合

电容性耦合干扰起因于电路间电场的相互作用，图 9.3-10 为两导体间电容性耦合噪声干扰模式。其中，电容 C_{12} 为导体 1 与导体 2 之间的电容， C_{1G} 为导体 1 与地间的电容， C_{2G} 为导体 2 与地间的电容，导体 2 通过电阻 R 接地。电容耦合可以用图 9.3-10 (b) 的等效电路进行分析，若导体 1 上的电压 V_1 为干扰源，导体 2 为被干扰电路，耦合到导体 2

上的噪声电压为

$$V_N = \frac{j\omega R C_{12}}{1 + j\omega R (C_{12} + C_{2G})} V_1 \quad (9.3-22)$$

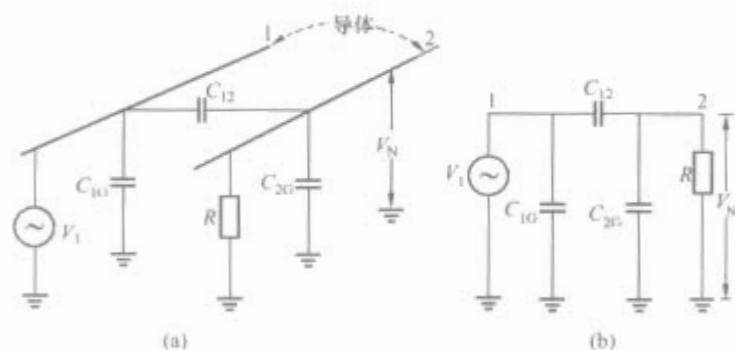


图 9.3-10 两导体之间的电容性干扰

(a) 实体图; (b) 等效电路

若 R 为低阻抗且远小于分布电容 C_{12} 和 C_{2G} 之和的容抗, 即

$$R \gg \frac{1}{\omega(C_{12} + C_{2G})} \quad (9.3-23)$$

则式 (9.3-22) 可简化为

$$V_N = j\omega R C_{12} V_1 \quad (9.3-24)$$

上式表明, 干扰电压正比于干扰源信号频率、受干扰电路阻抗 R 、导体之间电容 C_{12} 及干扰源电压 V_1 的值。

若 R 为高阻抗或者在高频下, 且有

$$R \gg \frac{1}{\omega(C_{12} + C_{2G})} \quad (9.3-25)$$

那么式 (9.3-22) 可简化为

$$V_N = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} V_1 \quad (9.3-26)$$

上式则表明, 导体 2 与地间的噪声电压为 C_{12} 和 C_{2G} 的分压, 与频率无关, 而且一般比低 R 值的式 (9.3-24) 给出的结果大。

图 9.3-11 为电容性噪声干扰电压的频率响应, 即式 (9.3-22) 与频率 ω 的关系图, 由图可看出实际的噪声电压总是小于或者等于式 (9.3-26) 所给的值。当频率为

$$\omega = \frac{1}{R(C_{12} + C_{2G})} \quad (9.3-27)$$

时, 式 (9.3-24) 的结果为实际值的 1.41 倍 (相差 3dB)。在实际中, 频率一般小于式 (9.3-27) 所给出的值, 采用式 (9.3-24) 所计算的误差不会超过有关的技术要求。

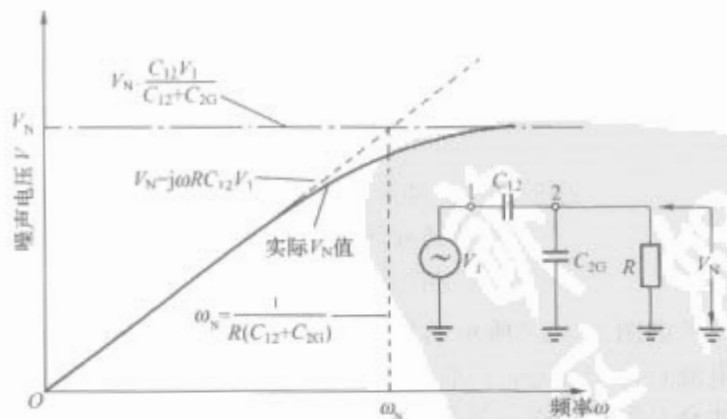


图 9.3-11 电容性噪声干扰电压的频率响应

导体之间的电容及导体与地间的电容可以近似计算得到。两平行导体的分布电容为

$$C_{12} = \frac{l\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\cosh^{-1}(D/d)} \quad (9.3-28)$$

式中: D 是导体间隔距离; d 是导体直径; l 是导体长度, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, ϵ_r 为相对电容率。

若 $D > 3d$ 且 C_{12} 发生在空气中, 式 (9.3-28) 可以简

化, 单位长度的分布电容为

$$\frac{C_{12}}{l} = \frac{27.8}{\ln(2D/d)} \quad (\text{pF/m}) \quad (9.3-29)$$

导体间隔对电容噪声干扰的影响如图 9.3-12 所示, 0dB 的参考点取自导体间的距离为导体直径的 3 倍, 由图 9.3-12 中可看出相隔距离超过 40 倍导体直径, 再增加隔开的距离已无法得到显著的噪声衰减。

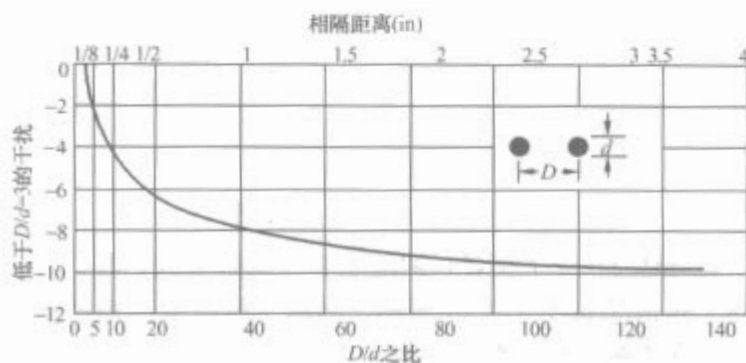


图 9.3-12 导体间隔对电容性噪声干扰的影响

导体与地之间的分布电容可计算为

$$C_{2G} = \frac{2l\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\cosh^{-1}(2a/d)} \quad (9.3-30)$$

若 $a > 3d$, 则式 (9.3-30) 可简化, 单位长度的分布电容为

$$\frac{C_{2G}}{l} = \frac{55.6\epsilon_r}{\ln(4a/d)} \quad (9.3-31)$$

式中: 只有当导体与地之间的所有空间都被绝缘材料包裹时, ϵ_r 才成为因子; 否则, $\epsilon_r = 1$ 。

在图 9.3-10 中, 如果导体 2 至地端的阻值为无限大, 且导体 2 外面有一屏蔽物 (见图 9.3-13), 则此屏蔽物接收到的噪声为

$$V_S = \frac{C_{1S}}{C_{1S} + C_{2G}} V_1 \quad (9.3-32)$$

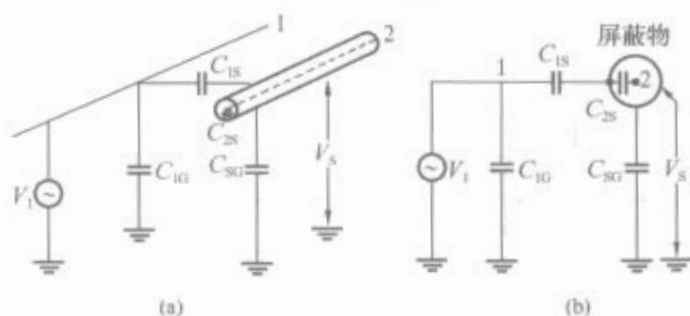


图 9.3-13 屏蔽物置于导体 2 的电容性噪声干扰情形

(a) 实体图; (b) 等效电路

因 C_{2S} 上无电流流动, 故导体 2 接收的噪声为

$$V_N = V_S \quad (9.3-33)$$

若屏蔽物接地, 电压 $V_S = 0$, 导体 2 上的噪声电压 V_N 也为 0。此情况是假设导体 2 不暴露于屏蔽物的外面, 但实际情况并非如此。

真正的应用情况是中央导体 (受干扰者) 总是会延伸到屏蔽物的外面, 其电容性噪声干扰情况如图 9.3-14 所示。 C_{12} 为导体 1 与导体 2 间的分布电容, C_{2G} 为导体 2 与地间的电容。若屏蔽物接地, 感应到导体 2 的噪声电压为

$$V_N = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2S} + C_{2G}} V_1 \quad (9.3-34)$$

导体 2 超出屏蔽物外的量直接影响到 C_{12} 的大小, 因此也影响到 V_N 的值。所以优良的电场屏蔽作用应具备两个条件: ①尽量将中央导体超出屏蔽物外的长度减至最小; ②屏蔽物良好的接地。若导体长度不超过 $1/20$ 的波长 (工作的信号波长), 则单点接地; 若导体长度较长, 则采用多点接

地的方式。

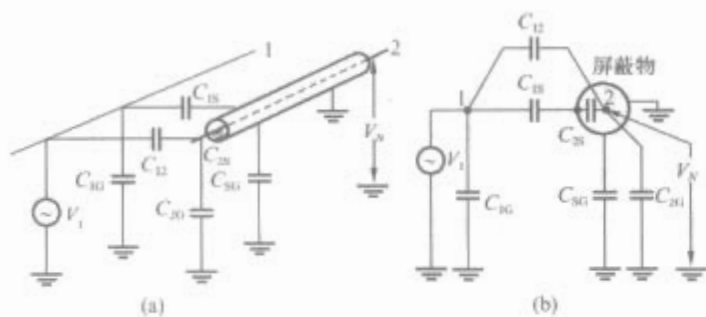


图 9.3-14 导体 2 超出屏蔽物外的
电容性噪声干扰情况
(a) 实体图; (b) 等效电路

若导体 2 (受干扰者) 到地端有一电阻负载, 其电容性噪声干扰情况如图 9.3-15 所示。因跨于噪声源与地的任何电容不会影响干扰, 都可忽略这些电容, 其分析与图 9.3-10 类似, C_{2G} 以 C_{2G} 及 C_{2S} 的和替代, 若

$$R \ll \frac{1}{\omega(C_{12} + C_{2S} + C_{2G})} \quad (9.3-35)$$

导体 2 上感应到的噪声电压为

$$V_N = j\omega R C_{12} V_1 \quad (9.3-36)$$

此式与式 (9.3-24) 相同, 但 C_{12} 因屏蔽的关系, 其值小很多, 仅为导体 1 与超出屏蔽物外导体 2 的电容量。若屏蔽物为网状的, 还需考虑导体 1 与导体 2 间经屏蔽物空隙所产生的电容量。

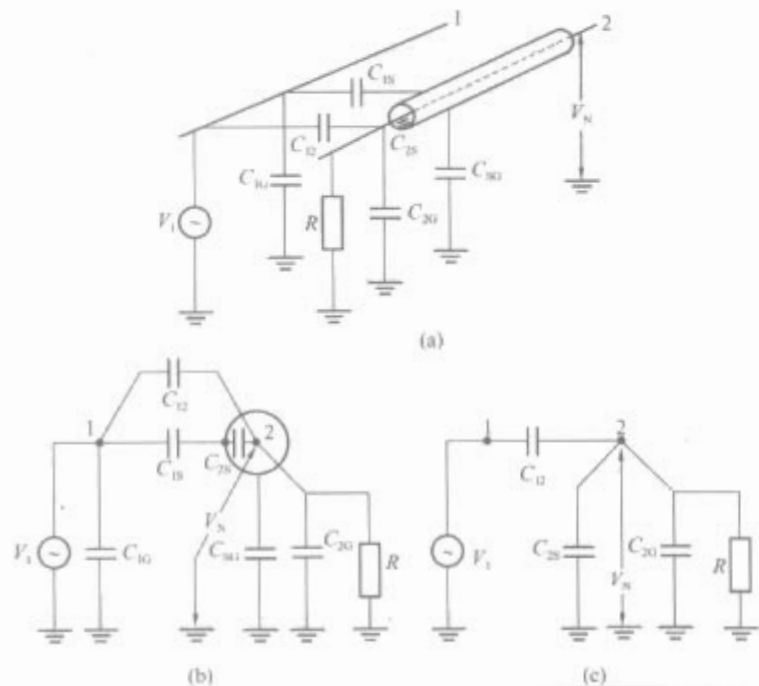


图 9.3-15 导体 2 含电阻负载的
电容性噪声干扰情况
(a) 实体图; (b) 等效电路; (c) 化简的等效电路

3.2.4 电感性耦合

一个闭合回路中的电流会在另一回路中产生磁通, 而磁通的变化会在另一个电路中感应出电压, 这就发生了电感噪声耦合, 通常也被称为磁场耦合。

图 9.3-16 为两电路间电感性噪声耦合的原理和等效电路图。其中, I_1 为干扰源电路上的电流; M 为两电路间的互感量, 与电路形状及电路间的介质磁性有关; 在电路 2 中形成的感应电压为

$$V_N = -\frac{d}{dt}(AB\cos\theta) = M \frac{dI_1}{dt} \quad (9.3-37)$$

式中: A 为电路 2 的面积; B 为电流 I_1 在电路 2 中产生的磁感应强度; θ 为磁场方向与回路面积之间的夹角。

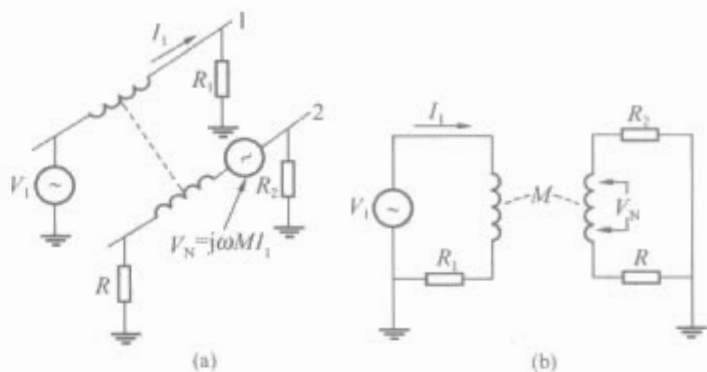


图 9.3-16 两电路间的电感性耦合
噪声的原理和等效电路图
(a) 实体图; (b) 等效电路

如果电路 2 的封闭回路是静止的且磁通密度为正弦时变的, 则由式 (9.3-37) 得

$$V_N = j\omega A B \cos\theta = jMI_1 \quad (9.3-38)$$

式 (9.3-38) 清楚地说明了互感耦合电压由电路的几何特性决定 (互感大小由几何特性决定), 还与干扰源电路中的电流大小及频率成正比。互感耦合与电容耦合相比, 有两个重要的不同, ①耦合噪声电压受干扰源电路阻抗的影响, 因为这些阻抗决定了干扰源电流 I_1 ; ②耦合噪声电压不依赖于敏感电路的负载阻抗。

如果在图 9.3-16 的导体 2 外放置一个非磁性、不接地的屏蔽物, 屏蔽物置于受干扰者之外的磁场干扰情况如图 9.3-17 所示, 其中 M_{1S} 为导体 1 与屏蔽物之间的互感。因为屏蔽物对电路的形状或电路间的介质没有任何影响, 故导体 2 所感应的电压也不会受到影响。屏蔽物会因导体 1 上的电路而产生噪声电压

$$V_S = j\omega M_{1S} I_1 \quad (9.3-39)$$

屏蔽物的一端接地时也不会改变此状况, 因此置于导体外的屏蔽物若不接地或只有单端接地, 并不会影响到受干扰者所感应到的噪声电压值。

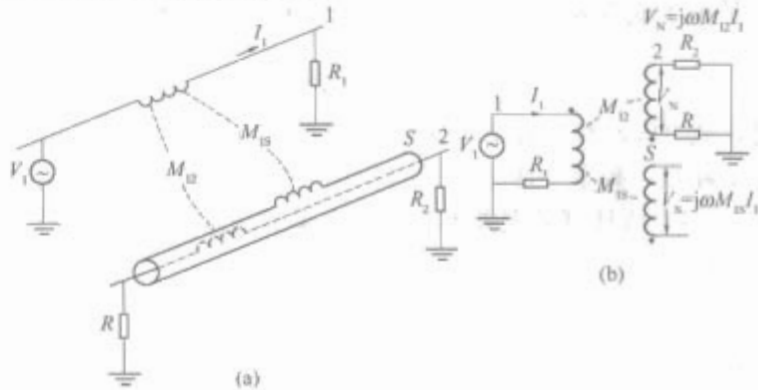


图 9.3-17 屏蔽物置于受干扰者
之外的磁场干扰情况
(a) 实体图; (b) 等效电路

考虑图 9.3-18 所示的管状导体, 如果管状导体上流动的电流对称于轴心, 则管内不会有磁场存在, 只有管状导体外才会有磁场存在。若在管内放一导线形成同轴电缆, 如图 9.3-19 所示, 则管状屏蔽导体上的电流 I_S 所产生的磁通 Φ 会围住中心导线 (或导体), 而屏蔽物的电感为

$$L_S = \Phi / I_S \quad (9.3-40)$$

中心导体与屏蔽导体的互感为

$$M = \Phi / I_S \quad (9.3-41)$$

因为这两个导体上的磁通相同, 故屏蔽物与中心导体间的互感等于屏蔽物的自感。

$$M = L_S \quad (9.3-42)$$

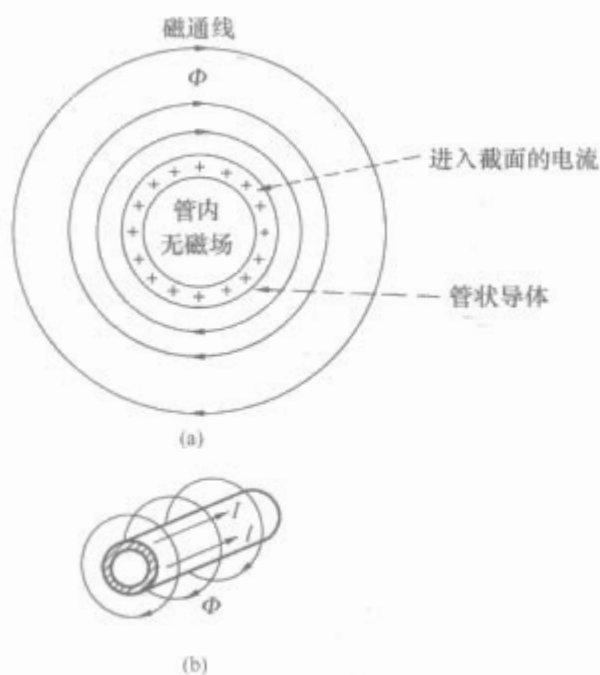
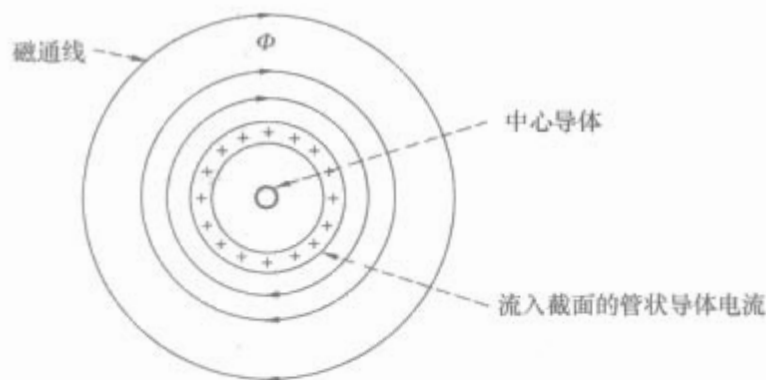

 图 9.3-18 管状导体所产生的磁场
(a) 正视图; (b) 侧视图


图 9.3-19 含屏蔽层电流的同轴电缆

式 (9.3-42) 在同轴电缆的分析中占有相当重要的地位。因电流 I_S (管状屏蔽物上的电流) 而使中心导体感应到的电压 V_N 可表示为

$$V_N = j\omega M I_S \quad (9.3-43)$$

若屏蔽物上的电流 I_S 是由电源 V_S 所产生的 (见图 9.3-20), 而 L_S 及 R_S 分别为屏蔽导体的电感与电阻, 则电流 I_S 为

$$I_S = \frac{V_S}{L_S} \left(\frac{1}{j\omega + R_S/L_S} \right) \quad (9.3-44)$$

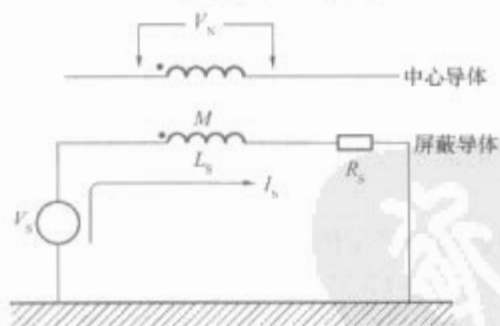


图 9.3-20 屏蔽导体的等效电路

因此,

$$V_N = \frac{j\omega M V_S}{L_S} \frac{1}{j\omega + R_S/L_S} \quad (9.3-45)$$

因为 $L_S = M$, 故有

$$V_N = \frac{j\omega}{j\omega + R_S/L_S} V_S \quad (9.3-46)$$

同轴电缆因屏蔽导体电流引起中心导体上的感应电压如图 9.3-21 所示, 曲线上的分离频率点定为屏蔽物的截止频率 ω_c , 其值为

$$\omega_c = \frac{R_S}{L_S} \text{ 或 } f_c = \frac{R_S}{2\pi L_S} \quad (9.3-47)$$

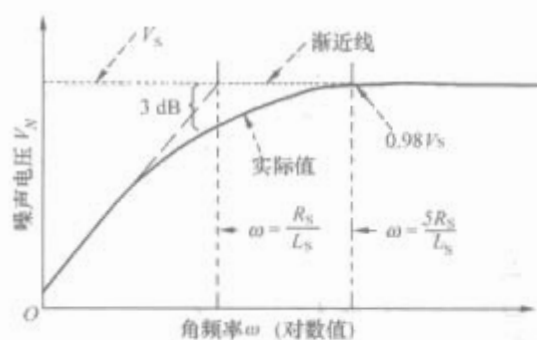


图 9.3-21 同轴电缆因屏蔽导体电流引起的中心导体上的感应电压

因此屏蔽导体上若有电流流动, 中心导体感应到的噪声电压由直流时的零值增加到截止频率处约等于屏蔽导体上的电压。当信号频率高于屏蔽截止频率时, 该特性可有效抑制磁场干扰的发射, 而不受磁场干扰的最佳方法是尽量减小受干扰者的回路面积。

3.2.5 导线对导线的串扰

3.2.5.1 电容性耦合的串扰

根据 3.2.3 节提及电容性的噪声干扰, 将图 9.3-10 改绘为图 9.3-22 分析导线对导线的串扰。利用式 (9.3-22) 与式 (9.3-24), 当频率 $f \ll (2\pi C_{12} Z_V l)^{-1}$ 时可得

$$\frac{V_N}{V_1} = \frac{j\omega C_{12} Z_V l}{1 + j\omega C_{12} Z_V l} \approx j\omega C_{12} Z_V l \quad (9.3-48)$$

式中: ω 为角频率; C_{12} 为两导线间单位长度的平均分布电容; Z_V 为导线 2 (受干扰者) 的负载阻抗 (包括 Z_{V1} 、 C_{2G} 及 Z_{V2}); l 为导线长度; V_N 与 V_1 为受干扰者与干扰者的信号电压。

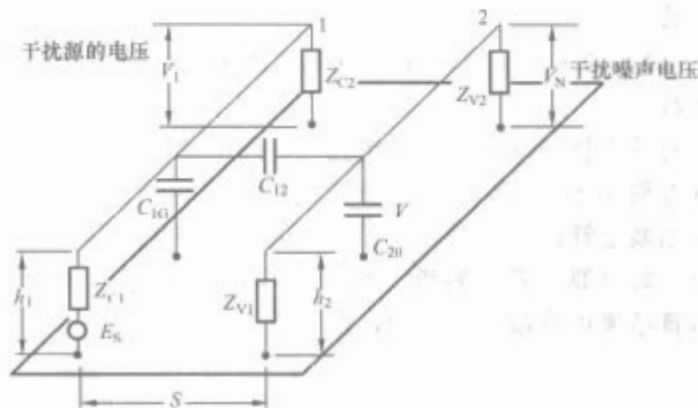


图 9.3-22 位于接地面上的两条导线的电容性噪声干扰模式

两条导线间的耦合程度可定义为

$$C_{CV} = 20 \lg(V_N/V_1) \quad (9.3-49)$$

C_{CV} 的值也称为导线间的串扰, 耦合并不具有任何放大作用, 所以串扰值一定小于 0dB。导线长度和受干扰回路的负载会影响最终的串扰。

3.2.5.2 电感性耦合的串扰

同样的, 参照 3.2.4 节的电感性噪声干扰, 也可利用图 9.3-23 的模式定出串扰。利用类似式 (9.3-48) 的方法, 可得

$$\frac{V_N}{V_1} = \frac{Z_{V2}}{Z_{V1} + Z_{V2} + j\omega L_2 l} \cdot \frac{\omega M_{12} l}{Z_{C2}} \quad (9.3-50)$$

式中: ω 为角频率; M_{12} 为两导线间单位长度的互感; L_2 为受干扰导线单位长度的自感; Z_{C2} 为干扰者的负载; Z_{V1} 为受干扰者的信号源阻抗; Z_{V2} 为受干扰者的负载阻抗; l 为导线长度。

电感项的量会因使用的导线线径及离接地面的高度而有不同, 互感量则又会因导线间的相隔距离而有差异。按照式

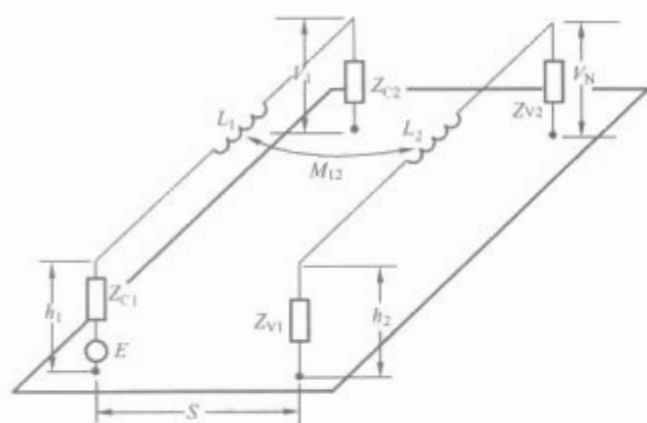


图 9.3-23 两导线间电感性干扰的示意图

(9.3-49) 串扰的定义，电感性串扰为

$$C_{CV} = 20\lg(V_N/V_1) \quad (9.3-51)$$

电感性串扰量 C_{CV} 对高度 h 的变化相当敏感，也与导线长度及干扰源回路负载阻抗有关。

3.2.5.3 综合串扰

实际电路中电容性串扰和电感性串扰是同时存在的，需分别求出各自的单独串扰量，然后再找出其综合的干扰效应。由图 9.3-24 可知，负载上的干扰不仅与导线间电容性串扰和电感性串扰的数值有关，而且导线中电流方向会影响干扰的结果，必须事先知道受干扰者是接近干扰源（近端）还是位于干扰源的另一端（远端）。

若受干扰者位于干扰源附近（近端者），则电感性的干扰要叠加在电容性干扰上；若位于远端，则电容性干扰要减去电感性干扰。即

近端： $V_{\text{受干扰者}} = V_{\text{干扰源}} \times (\text{电容性串扰系数} + \text{电感性串扰系数})$

远端： $V_{\text{受干扰者}} = V_{\text{干扰源}} \times (\text{电容性串扰系数} - \text{电感性串扰系数})$

若受干扰导线两端的阻抗相同，而电感性串扰与电容性串扰差额小于 20dB 时，远端与近端结果的差别相当明显。进行加减运算时，需要以实际电压值进行加减运算，而非以其分贝数计算。若电容性与电感性串扰相差超过 20dB 时，则运算结果可直接选较大的，误差不会超过 5%。

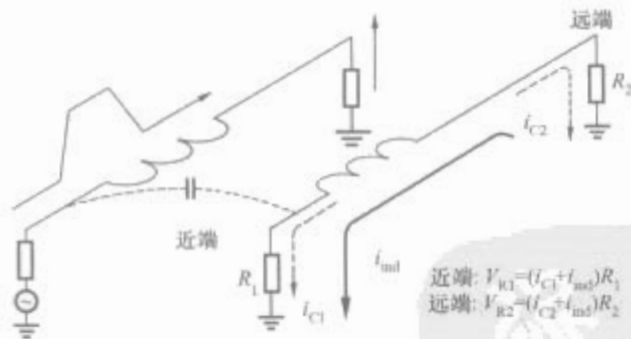


图 9.3-24 电容性及电感性串扰的综合影响

3.2.6 场对导线的辐射共模耦合

如图 9.3-25 所示，共模耦合将外界的电场或磁场转换成环路面积上的共模噪声电压 V_i ，此噪声电压即为电磁干扰源，会将噪声电流传到环路及导线上，而导线上的电流将会以噪声电压 V_o 的方式出现在放大器输入端或逻辑电路输入端，成为电路的电磁干扰源。

两个连接的设备若置于接地面或安全地线附近时，就可能形成地环路。虽然回路阻抗有高有低，但其感应的噪声电压与回路的阻抗无关。悬浮于空间的导线如同一个接收天线，如果导线恰好受到水平电场的干扰且导线长度远小于信号的波长 λ ，则导线感应的开路电压 V 为

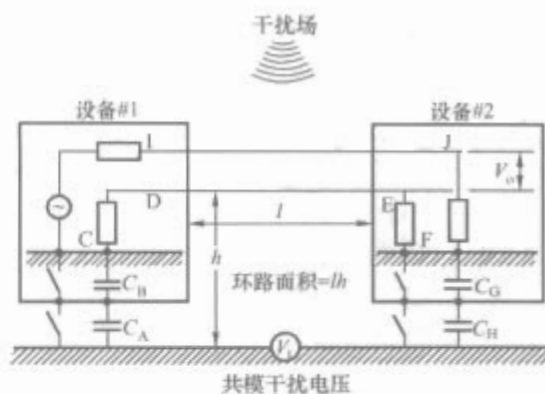


图 9.3-25 场对电缆的共模耦合

$$V = \int_0^l E \cdot dl \approx El \quad (9.3-52)$$

式中： E 为电场强度； l 为导线受到电场干扰的长度。

此共模噪声电压 V 通过导线的电容，将在导线上产生电流。如果导线的两端各接有电气设备、电路或终端设备时，回路面积和导线电容都会增加，导致共模电压及电流随之增加。电场对封闭回路所形成的共模耦合（CMC）可计算为

$$CMC_{dB} = 20\lg(V_i/E) \quad (9.3-53)$$

式中： $V_i/E = 2l \cdot \cos\theta \cdot \sin(\pi h \cos\alpha/\lambda)$ ，而 h 及 l 都远小于 λ ； V_i 为感应的回路电压，V； E 为进入的电场强度，V/m； h 为回路的平均高度，m； l 为回路的长度，m； λ 为波长，m； θ 为回路所在方向与电场传播方向的夹角； α 为 l 与 E 之间的夹角； CMC_{dB} 以 $1V/(V/m) = 1m$ 为 0dB(m)。

通常假设 $\alpha = \theta = 45^\circ$ 且 $h, l < \lambda/2$ ，则有

$$\frac{V_i}{E} = \sqrt{2}l \sin\left(\frac{\pi h}{\sqrt{2}\lambda}\right) \quad (9.3-54)$$

图 9.3-26 与图 9.3-27 为电场耦合产生的共模噪声干扰。当频率较低， $l < \lambda/2$ 时，如式 (9.3-54) 共模干扰随频率增加为 20dB/10 倍频。此增加的趋势在 $l = \lambda/2$ 时停止，超过此频率， l 呈多谐振点的性质。把式 (9.3-54) 中 l 以 $\lambda/2$ 代替，则 $l \geq \lambda/2$ 且 $h < \lambda/2$ 时

$$\frac{V_i}{E} = \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda \sin\left(\frac{\pi h}{\sqrt{2}\lambda}\right) \quad (9.3-55)$$

上式就对应于图 9.3-26 和图 9.3-27 中的平坦部分。若平均高度 h 大于长度 l ，则谐振点 $\lambda/2$ 先经过高度 h ，故 $h \geq \lambda/2$ 且 $l < \lambda/2$ 时的共模干扰为

$$\frac{V_i}{E} = \sqrt{2}l \quad (9.3-56)$$

上式也对应于图上的平坦部分且与频率无关。

使用图 9.3-26 和图 9.3-27 时，先选定最近的 l 及 h 值，再求出对应的面积大小与横轴频率的交叉点即为所求的共模干扰值。

磁场在回路中产生的共模耦合为

$$CMC_{dB} = 20\lg(V_i/B) \quad (9.3-57)$$

式中： $V_i/B = 2lc \sin\theta \cdot \sin[(\pi h \cos\alpha)/\lambda]$ ，若 h 及 l 都远小于 λ ； V_i 为感应的回路电压，V； B 为磁通密度，T； h 为回路平均高度，m； l 为回路长度，m； λ 为波长，m； $c = 3 \times 10^8$ m/s 为光的传播速度； α 为回路所在方向与磁场传播方向的夹角； θ 为 l 方向与垂直于磁场的平面的夹角。 CMC_{dB} 以 1V/T 为 0dBV/T，或以每高斯 1V 为 0dBV/G（等于 80dBV/T）。类似电场耦合的推导，可得

$$\begin{aligned} \frac{V_i}{B} &= \sqrt{2}lc \sin\left(\frac{\pi h}{\sqrt{2}\lambda}\right), \text{若 } \frac{l}{\lambda} \text{ 及 } \frac{h}{\lambda} \leq 0.5 \\ \frac{V_i}{B} &= \frac{\lambda c}{\sqrt{2}} \sin\left(\frac{\pi h}{\sqrt{2}\lambda}\right), \text{若 } \frac{l}{\lambda} > 0.5 \text{ 且 } \frac{h}{\lambda} < 0.5 \end{aligned} \quad (9.3-58)$$

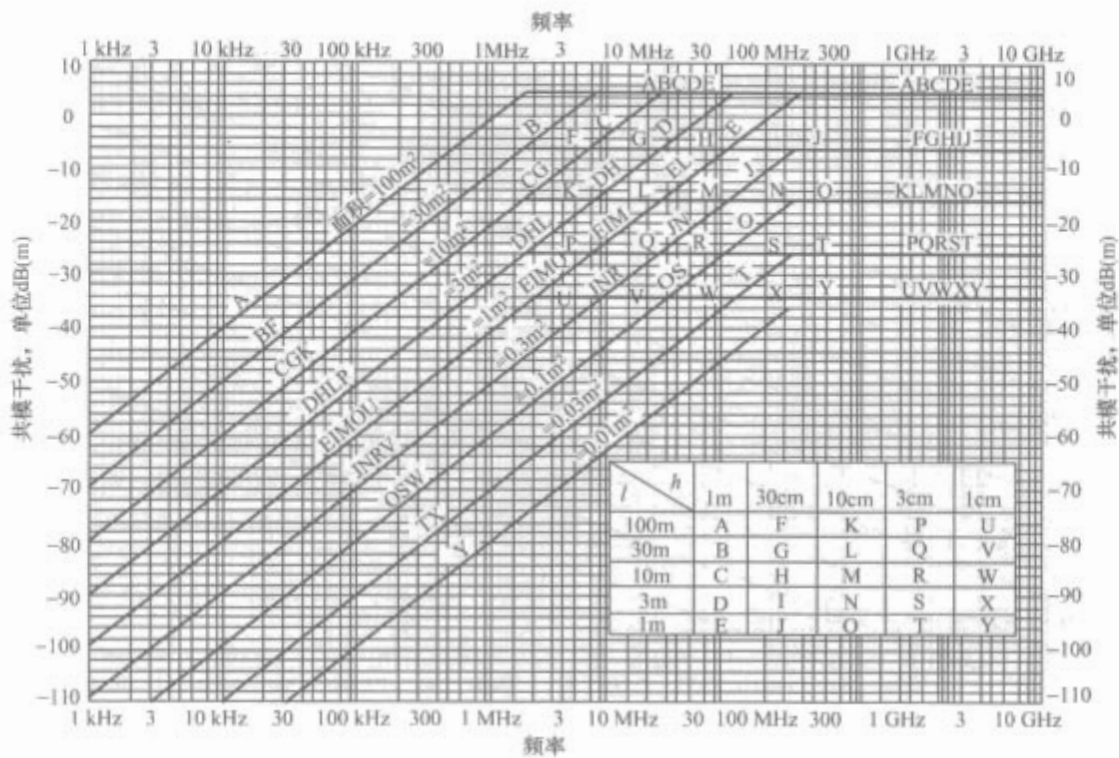


图 9.3-26 电场对大型接地环路的共模噪声干扰

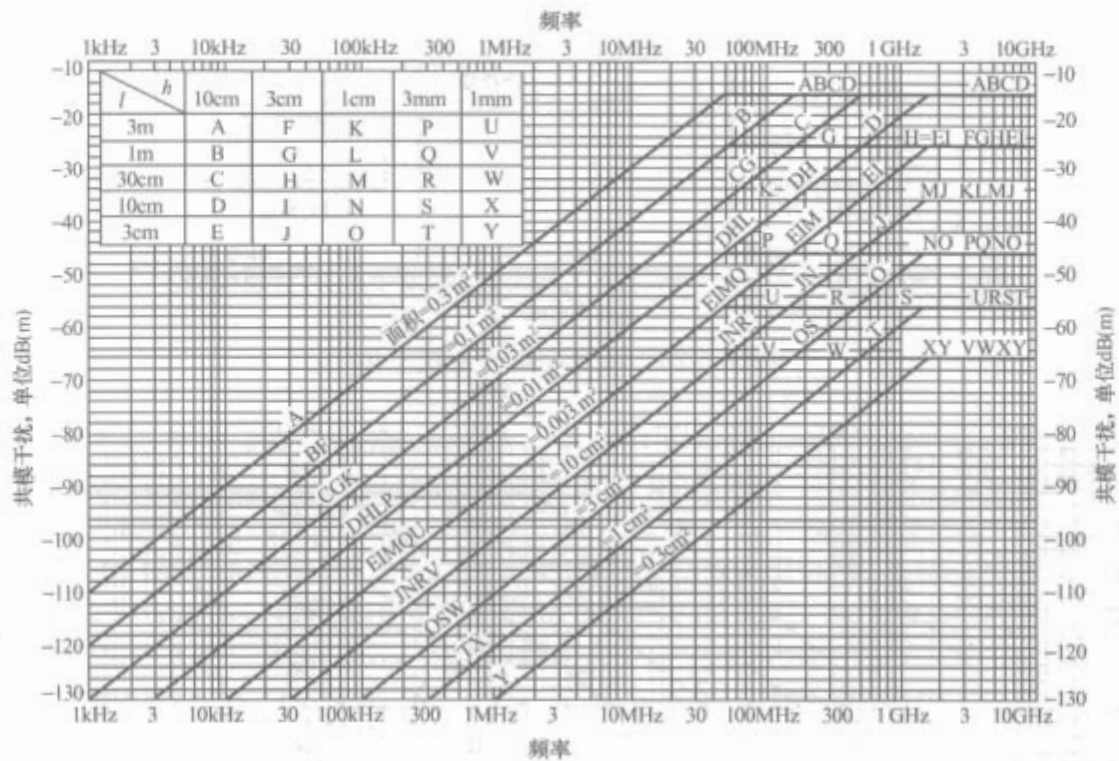


图 9.3-27 电场对小型接地环路的共模噪声干扰

式 (9.3-58) 的结果绘于图 9.3-28 中, 参数的选用和图形曲线的使用方法与图 9.3-26 及图 9.3-27 相同。

3.2.7 场对导线的辐射差模耦合

差模干扰耦合是将辐射到连接线长度和间隔所围成面积上的电场和磁场转换成差模干扰电压, 此电压出现在受干扰电路的输入端, 成为电磁干扰的来源, 如图 9.3-29 所示。同轴电缆上也会发生差模干扰, 同轴电缆的表层感应到干扰电流, 经同轴电缆的转换阻抗, 就会转成差模干扰电压。电场或磁场所产生的差模干扰耦合可以分为平衡导线和非平衡同轴电缆传输线两种类型。

3.2.7.1 平衡导线

对于平衡导线, 在 3.2.6 节中得到的计算式可用来计算电场和磁场产生的差模干扰。将公式中代表共模回路平均高度的“ h ”换成代表差模导线间隔的“ d ”, 电场耦合的差模干扰如图 9.3-30 所示, 磁场耦合的差模干扰所图 9.3-31 所

示, 图中的参数对应于导线间的面积。差模干扰随频率以 20dB/10 倍频速率增加, 直到 $l=\lambda/2$ 的频率为止。超过 $l=\lambda/2$ 的频率, 差模干扰与频率无关。

3.2.7.2 非平衡导线

对于非平衡导线, 其差模干扰实际可分成两部分。第一部分为场对导线的干扰, 在电缆表层产生干扰电流; 第二部分为电缆的转换阻抗, 在受干扰电路的输入端将表层电流转换成差模电压, 结合这两项, 可得差模耦合 (DMC) 为

$$\begin{aligned} DMC_{dB} &= 20\lg(I_c/E) \times (Z_T/2) \\ &= 20\lg(I_c/E) + Z_T(dB\Omega) - 6(dB) \end{aligned} \quad (9.3-59)$$

式中: I_c 为电场耦合的电缆表层感应电流; Z_T 为同轴电缆的转换阻抗。

电场在电缆上产生的电流主要取决于电缆两端间的电容, 当电缆长度 $l \ll \lambda$ 时, 电缆上感应的开路电压 V_i 为

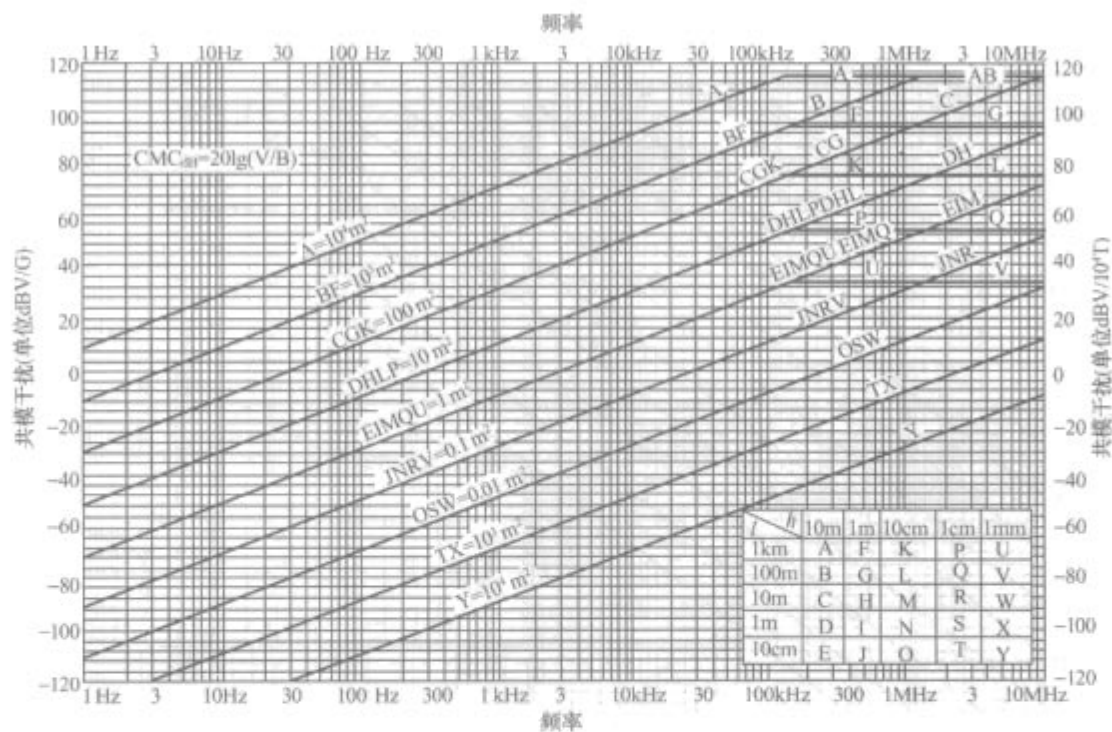


图 9.3-28 磁场对接地环路的共模噪声干扰

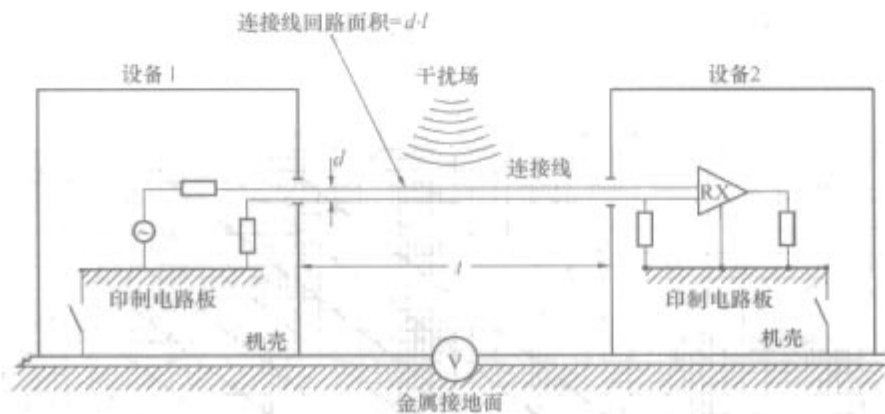


图 9.3-29 场对导线的差模干扰

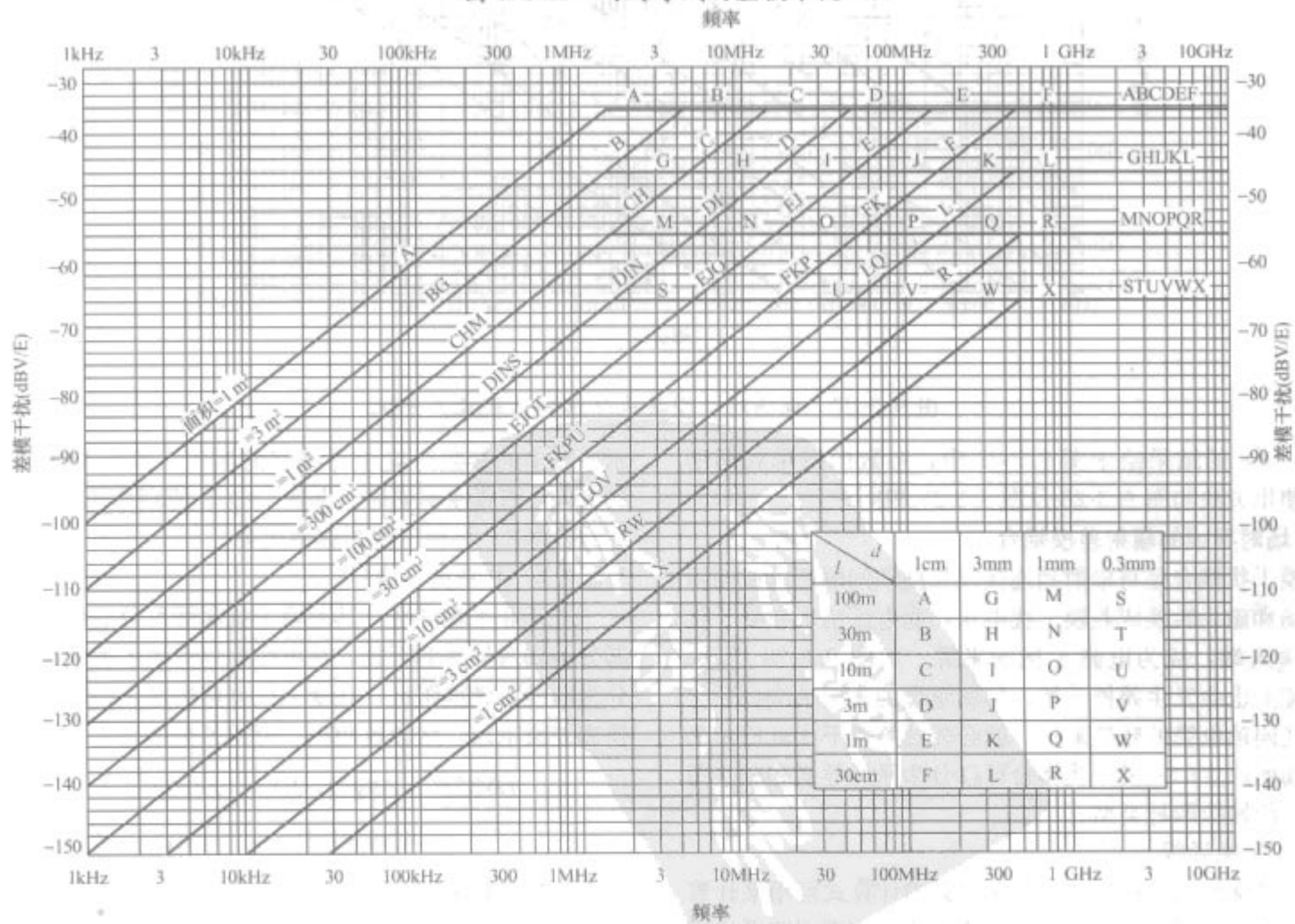


图 9.3-30 电场耦合频率的差模干扰

式(9.3-65)的表示方法使得差模耦合更容易计算。

4 敏感系统的电磁敏感性

电磁敏感性指“存在电磁骚扰的情况下，装置、设备或系统不能避免性能降低的能力。”实际上，抗扰度和敏感性反应的都是装置、设备或系统的抗干扰能力，仅仅是从不同角度而言，敏感性高，则抗扰度低。在国际和国内，军用标准体系常用敏感性这一术语，而民用标准体系惯用抗扰度描述。

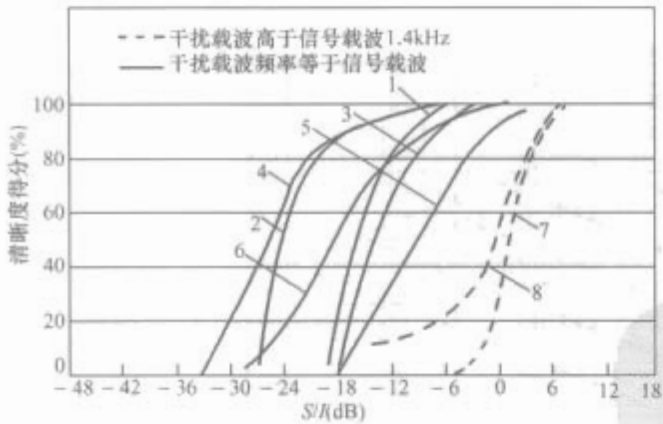
4.1 常见的敏感设备及其电磁干扰敏感性评定标准

评定电磁干扰对系统或设备性能影响的标准是根据该系统或设备的使用目的来确定的，不同种类的设备使用不同的性能评定标准。话音通信系统是利用在主观清晰度试验中得到的可懂度试验数据来判断敏感性，图像通信系统则以各种干扰情况下观察人员对图像质量评分的主观性统计数据作为评判标准，雷达系统、数字数据系统、模拟数据系统等其他系统也都有自己的评判标准。为了便于系统电磁兼容性预测分析，把各种性能评定标准与信号干扰比(S/I)联系起来，并提出可接受的比值，即门限值。

4.1.1 话音通信系统

要规定话音通信系统的测量标准是很复杂的，一种评定标准是可懂度(即清晰度)，是清晰度试验中听话人能听懂的单词数量与试验所用单词总数的百分比。

清晰度试验由经过训练的发话人或一个标准化的话音发生器读出一组经选择的单词或音节，经通信系统传输后，听话人把听到的单词或音节写在试卷上，试验时将各种电平干扰注入传输信道。根据听话人听懂的单词或音节的数量来评定分数，清晰度得分代表了可懂度水平。有用信号和干扰信号几种不同组合情况下，信号干扰比与清晰度得分(即可懂度)的典型试验结果如图9.3-33所示，图中各种干扰情况均为同道干扰情况。很明显，话音通信系统的性能随S/I变化从良好到差劣的转换速率很快。



标号	信号	干扰	标号	信号	干扰
1	AM	SSB	5	SSB	SSB
2	AM	SSB多路	6	SSB	SSB多路
3	DSB	SSB	7	AM	AM
4	DSB	SSB多路	8	AM	AM多路

图9.3-33 话音通信系统性能清晰度得分与信号干扰比关系

4.1.2 图像通信系统

图像通信系统的性能是根据终端图像的显示质量来评定的。电磁干扰很可能会降低图像传输质量，使显示画面污染或画面滚动等，干扰对图像通信系统性能影响的评定结果带

有一定主观性。一种评定标准是根据系统受干扰程度把性能分成很好、好、合格、勉强合格、差5个等级。典型试验结果如图9.3-34所示，图中画出的是随机干扰情况，信号干扰比(S/I)是同步信号幅度与6MHz电视通道内噪声均方根值之比。

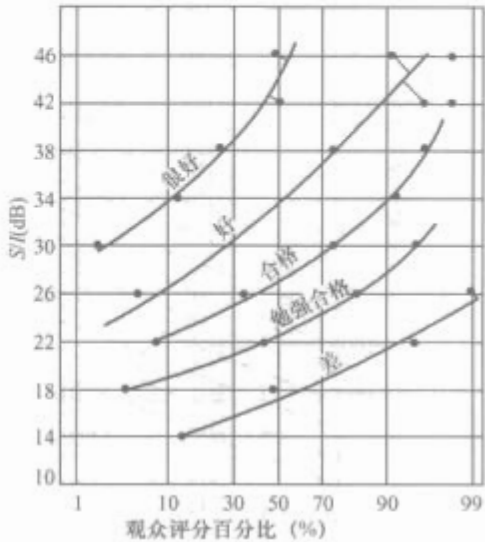


图9.3-34 对电视机的随机噪声干扰

4.1.3 数字通信系统

数字通信系统根据错误概率评定性能优劣。有两种错误，一种是虚警，即把干扰或噪声误认为信号；另一种是漏警，即没有意识到信号存在。虚警和漏警的相对发生率要以接收机输出中信号、干扰和噪声的概率密度来确定。

4.1.4 雷达系统

对于雷达系统，最常见的干扰是由其他雷达的发射脉冲所引起，被干扰现象是在雷达显示屏上出现干扰点或干扰螺旋线。在评定抗干扰性能时，将附近雷达的典型干扰信号与一个或几个有用目标信号混合，然后测出受过训练的雷达员发现目标所需要的时间。每种干扰状态对应一个信号干扰比S/I，雷达探测距离的减小可换算成探测时间的增加。

4.2 电磁干扰敏感机理及敏感性能估算

对于敏感系统而言，大多数干扰现象是因干扰进入接收机射频端口而引起的，干扰进入端口引起设备敏感有线性和非线性两种作用方式。

4.2.1 线性干扰

在线性干扰方式中，敏感设备的接收机相当于普通的带通滤波器，能接收落在接收通带内的任何频率分量，线性干扰信号可以分为以下两类。

4.2.1.1 宽带干扰

宽带干扰有不相干和相干两种。

(1) 不相干干扰(如自然干扰)可用其功率谱密度表示，经接收机放大器进入的干扰噪声方值均为

$$\overline{V_0^2} = \int_0^\infty N_1(f) |H(f)|^2 df \tag{9.3-66}$$

式中： $N_1(f)$ 为接收机输入噪声功率谱密度， V^2/Hz ； $H(f)$ 为从接收机输入到中频放大器输出的复转移特性。

(2) 电动机和荧光灯等人为噪声源产生的相干噪声，可用噪声脉冲的电压谱密度来表示。当频谱为 $V(f)$ 的信号输入放大器时，放大器的瞬时输出电压为

$$V_0(t) = \text{real} \left[\int_0^\infty V(f) H(f) e^{j2\pi ft} df \right] \tag{9.3-67}$$

检波器的输入信噪比可利用上面的计算公式和输出信号电平来确定，输出信噪比则取决于调制信号和噪声波形以及检波方式。

4.2.1.2 窄带干扰

通常是来自通信电子设备或其他高频发生装置等有用源的干扰信号,这种信号的频率与接收机频率相同或相近,带宽较窄,可分为同道干扰和邻道干扰。

(1) 同道干扰是指来自载波频率相同或相近的通信系统的干扰,一般可采取下列两种简单方法进行估算。

1) 若干扰信号频带与接收机中频带宽相比很窄,则可将干扰信号看作是纯正弦波,按有用信号的计算方法估算中频放大器输出的干扰功率。

2) 若干扰信号的频带宽于接收机中频带宽,可将干扰信号看成宽带相干噪声处理。

(2) 邻道干扰是指工作于相邻信道通信系统之间的干扰。信道间距的规定各不相同,这里“邻道”指相邻信道频率差值大于两个信号中频带宽的平均值,但小于射频带宽平均值。邻道干扰的估算方法一般有下面三种。

1) 干扰信号为未调制载波或调制带宽很窄,可将干扰信号看作纯正弦波来处理。

假定接收机的选择电路由 n 个相同带宽的单调谐 RLC 并联电路组成,其带宽 B 相对于中心频率 f 的比值很小,则该选择电路的 3dB 带宽为

$$B_3 = B \sqrt{(2^{1/n} - 1)} \quad (9.3-68)$$

相对响应可由下式计算

$$H_n(f) = \left[\frac{1 + 4(f - f_0)^2 (2^{1/n} - 1)}{B_3^2} \right]^{-n/2} \quad (9.3-69)$$

若频率 f_b 的干扰信号平均功率为 P_b ,则接收机选择电路输出端干扰信号的功率为

$$P_i = |H_n(f_b)|^2 P_b \quad (9.3-70)$$

2) 干扰信号中心频率与接收机调谐频率相差较大,因而干扰频谱在接收机通带内近似为幅度不变的宽带噪声,此时可用宽带不相干噪声估算方法来处理。

3) 频带有限的干扰,其频谱有一小部分与接收机选择曲线重叠。设干扰信号功率谱密度为 Φ_i ,则通过通带的干扰信号功率为

$$P_i = \int_0^\infty \Phi_i |H_n(f)|^2 df \quad (9.3-71)$$

4.2.2 非线性干扰

非线性干扰是由于接收机输入滤波电路对无用信号抑制不充分或者电子器件中某种非线性过程造成的。接收机常见的非线性干扰现象有乱真响应、交调、互调和灵敏度降低等。

4.2.2.1 乱真响应

当接收机通带外干扰信号(或其谐波)与本机振荡频率(或其谐波)在接收机前级非线性电子器件上混频产生的频率接近接收机中频时,将产生乱真响应。

(1) 乱真响应频率可按式计算

$$f_s = |mf_0 \pm f_i| / n \quad (9.3-72)$$

式中: f_0 为接收机本机振荡频率; f_i 为接收机中频; m 和 n 为非零整数。

(2) 乱真响应的强度可按下列方法计算。接收机前级非线性器件晶体管、二极管和真空管等的输入和输出特性可用幂级数表示

$$Y = \sum_{n=0}^N a_n X^n \quad (9.3-73)$$

式中: X 为输入; Y 为输出; a_n 为常数。

设非线性器件输入端信号电压 $X_s(t)$ 和本机振荡器电压 $X_0(t)$ 分别为

$$X_s(t) = V_s(t) \cos(2\pi f_s t + \varphi_s) \quad (9.3-74)$$

$$X_0(t) = V_0 \cos(2\pi f_0 t) \quad (9.3-75)$$

式中: $V_s(t)$ 为信号调幅函数; f_s 为信号载波频率; φ_s 为相位角; V_0 为本机振荡器幅度; f_0 为本机振荡器频率。

在分析乱真响应时,令 $X = X_s + X_0$ 且 $N=3$, 则

$$Y(t) = \sum_{n=0}^3 a_n (X_s + X_0)^n \quad (9.3-76)$$

经分析展开后可知,混频器输出端的有用分量可以从幂级数的二次项得到,最大乱真响应分量由三次项产生。混频器输入端有用信号 D 与干扰信号 I 电平之比为

$$\frac{D}{I} = \frac{4a_2 V_{SD}}{3a_3 V_s V_0} \quad (9.3-77)$$

式中: V_{SD} 为混频器输入端有用信号包络的峰值振幅, V_s 为混频器输入端干扰信号振幅。

4.2.2.2 互调

接收机的互调是由于两个或两个以上带外干扰信号同时出现在非线性器件输入端,混频后产生落入带内的新的干扰信号所造成的。

(1) 当接收机通带外存在两个强干扰信号的频率满足下式时,就可能造成互调干扰。

$$mf_1 + nf_2 = f_0 \quad (9.3-78)$$

式中: f_0 为接收机调谐频率; 两个强干扰信号的频率分别为 f_1 和 f_2 ; m 和 n 为非零整数且不同时为负,互调的阶数定义为 $K = |m| + |n|$ 。

两个以上的强干扰信号频率满足

$$\sum_{i=1}^N n_i f_i = f_0 \quad (n_i \text{ 为整数}) \quad (9.3-79)$$

也会产生互调干扰,互调的阶数为 $K = |n_1| + |n_2| + \dots + |n_N|$ 。

(2) 在两个干扰信号的互调干扰中,三阶互调干扰幅值最大。

设两个干扰信号分别为

$$X_1(t) = V_1(t) \cos[2\pi f_1 t + \varphi_1(t)] \quad (9.3-80)$$

$$X_2(t) = V_2(t) \cos[2\pi f_2 t + \varphi_2(t)] \quad (9.3-81)$$

则,混频后的三阶产物为

$$I = \frac{3a_3}{4} V_1^2(t) V_2(t) \cos[2\pi(2f_1 - f_2)t + 2\varphi_1(t) - \varphi_2(t)] \quad (9.3-82)$$

信号干扰比为

$$\frac{S}{I} = \frac{4a_1 V_s(t)}{3a_3 V_1^2(t) V_2(t)} \quad (9.3-83)$$

式中: a_1 和 a_3 分别为器件幂级数展开式中的一次项和三次项的系数。

4.2.3 交调

接收机交调是由于干扰信号的调制转移到有用信号载波上所引起的,是器件三次非线性项产生的交调产物。

设有用信号 $X_s(t)$ 和干扰信号 $X_1(t)$ 分别为

$$X_s(t) = V_s(t) \cos(2\pi f_s t + \varphi_s) \quad (9.3-84)$$

$$X_1(t) = V_1(t) \cos[2\pi f_1 t + \varphi_1(t)] \quad (9.3-85)$$

则器件三次项产生的交调产物为

$$I = \frac{3a_3}{2} V_1^2(t) V_s(t) \cos[2\pi f_s t + \varphi_s(t)] \quad (9.3-86)$$

信号干扰比为

$$\frac{S}{I} = \frac{2a_1}{3a_3V_1^2(t)} \quad (9.3-87)$$

4.3 电气系统的敏感性

4.3.1 静电放电敏感性

电子产品或武器装备对静电放电（ESD）所表现出的敏感效应，其实质是组成产品整机的主要器件对 ESD 的敏感效应。ESD 不但可以引起电子线路的硬失效（致命失效），而且可以引起间断失效或翻转失效。翻转失效可能是靠近设备的 ESD 火花引起的，由 ESD 火花产生的电

磁脉冲（EMP）被设备拾取，导致错误翻转。如果设备在运行过程中出现翻转失效，随时可能会导致致命失效。致命的 ESD 失效是由于 ESD 在电子器件上引起的高压造成。

典型的 ESD 失效机理两类。一类是由 ESD 的高电压导致的介质击穿、气体电弧放电和表面击穿；另一类是 ESD 脉冲功率导致器件内部温度瞬变引起的热二次击穿、金属喷镀熔融和体积击穿。不同的微电子和半导体器件对 ESD 的敏感程度也不同，表 9.3-2 列出了常用器件对 ESD 敏感的成分和器件的类型、失效机理和失效特征。

表 9.3-2 对 ESD 敏感的器件

器件成分	器 件 类 型	失 效 机 理	失 效 特 征
MOS 结构	分立的 MOS 场效应晶体管、MOS 集成电路金属喷镀跨交的半导体、双极性和 MOS 数字集成电路、MOS 电容器、混合电路、线性集成电路	由于过电压和随后的大电流引起介质击穿	短路或大电流泄漏
半导体结	PN 和 PIN 肖特基二极管、晶体管、双极性、结型场效应晶体管、晶体管整流器、数字和线性的双极性集成电路、分立的 MOS 场效应晶体管、MOS 集成电路的输入保护电路	由于能量过大或过热引起微导离子区二次击穿造成的微扩散，硅和铝扩散（电迁移）使电流增大	电阻漂移
薄膜电阻器	混合集成电路、厚膜电阻器、薄膜电阻器、单片集成电路的薄膜电阻器和密封薄膜电阻器	介质击穿，随电压增加产生的新电流通路与焦耳热能有关的破坏性的微小电流通路	短路
金属积带	混合集成电路、单片集成电路、多指状覆盖式晶体管	与焦耳热能有关的金属喷镀烧毁	开路
场效应结构和非导电罩	使用非导电石英或陶瓷封装罩的 LSI 和存储器、ICS（尤其紫外线的 EPROMS）	由于 ESD 在表面上积存的离子引起的表面转化或栅极门限电压漂移	工作性能降低
压电晶体	晶体振荡器、声表面波器件	当所加电压过大时，由于机械力使晶体破碎	工作性能降低
间距很近的电极	声表面波器件、非钝化的薄金属无保护的半导体和微型电路	电弧放电软化和熔化电极金属	工作性能降低

4.3.2 电磁脉冲敏感性

核电磁脉冲（Nuclear Electromagnetic Pulse，NEMP 或 EMP）是伴随核爆炸产生的一种瞬时电磁辐射，是除冲击波、热辐射和核辐射效应之外又一种重要的核爆效应。任何形式的爆炸，都可以产生电磁辐射，EMP 产生机理一般分为康普顿电子模型和场位移模型。前者主要适用于大气层内外核爆炸情况，后者主要适用于地下核爆炸。EMP 时间波形可以用一个双指数表达式近似地解析表示，高空核爆归一化的时间波形为

$$E(t) = 5.25 \times 10^4 [\exp(-4 \times 10^6 t) - \exp(-4.76 \times 10^8 t)] \quad (9.3-88)$$

式中：E 为电场强度，V/m；t 为时间，s。这一脉冲的峰值是 50kV/m，脉冲从 10%~90%幅值的上升时间为 5ns，脉冲能量半峰值时间为 200ns。

EMP 对电气系统的影响有两种类型，一种是 EMP 辐射对电气系统的直接感应，另一种是 EMP 在天线、电力线和水管等外导体上感应出脉冲电压和电流，然后再引入到电气系统。

EMP 能量耦合进入电气或电子系统后，会对系统的功能产生影响，这种效应可能是暂时的或是永久的。系统的敏感性是指系统对耦合的 EMP 瞬态电冲击的响应，对任何器件或系统都有一个损伤阈值电平。对电子系统的大多数元件，损坏阈值与能量有关而不是与电流、电压有关。表 9.3-3 是几种元器件最小烧毁能量阈值。

在分析电气系统的敏感性时，需要确定一个或多个元器件在 EMP 威胁环境中是否失效。一般采用传递函数法或电路分析法，首先估计 EMP 在敏感元器件端产生的信号电平，然后把信号电平与元器件损伤阈值相比较，获得元器件的安全裕度。

表 9.3-3 几种元器件最小烧毁能量阈值

元件型号	最小能量	备 注
1N328	0.1 μJ	微波二极管(硅)
MC715	80 μJ	数据输入门集成电路(硅)
67D-5010	0.3mJ	锗变阻器(30J 额定值)
1N3720	0.5mJ	隧道二极管
2N398	0.8mJ	PNP 开关晶体管(锗)
2N3528	3mJ	硅可控整流器
2N594	6mJ	NPN 开关晶体管(锗)
2N36	40mJ	PNP 音频晶体管(锗)
6AF4	1J	超高频振荡电子管

5 系统电磁兼容性的基本分析方法

用于系统 EMI 预测的分析方法与分析设备的方法大不相同，它仅需要确定 EMI 源的输出特性及受扰设备的敏感度，无需了解各设备内部的详细特性。

5.1 系统内电磁兼容性分析

系统内电磁兼容性分析除要考虑天线间耦合外，还须考虑天线与机壳和线缆之间、线缆之间以及机壳之间的耦合。

5.1.1 耦合路径考虑

在建立系统内 EMI 预测方法之前，必须确定系统 EMI 的主要耦合路径，电磁干扰可以通过几个不同的路径从干扰源进入一个分系统，耦合至受害的接收器。通常在系统内既存在辐射耦合也存在传导耦合，辐射耦合与电缆、设备架以及接地平面所形成的感应回路面积有关，而传导耦合主要包括干扰源经电源耦合至受害设备电源端以及干扰电流经地平面流动至受害设备信号端两种情况。系统内的主要耦合途径有公共地阻抗的共模耦合、场对电缆的共模耦合、场对电缆的差模耦合、电缆之间的差模耦合和共用电源耦合等几种类型。

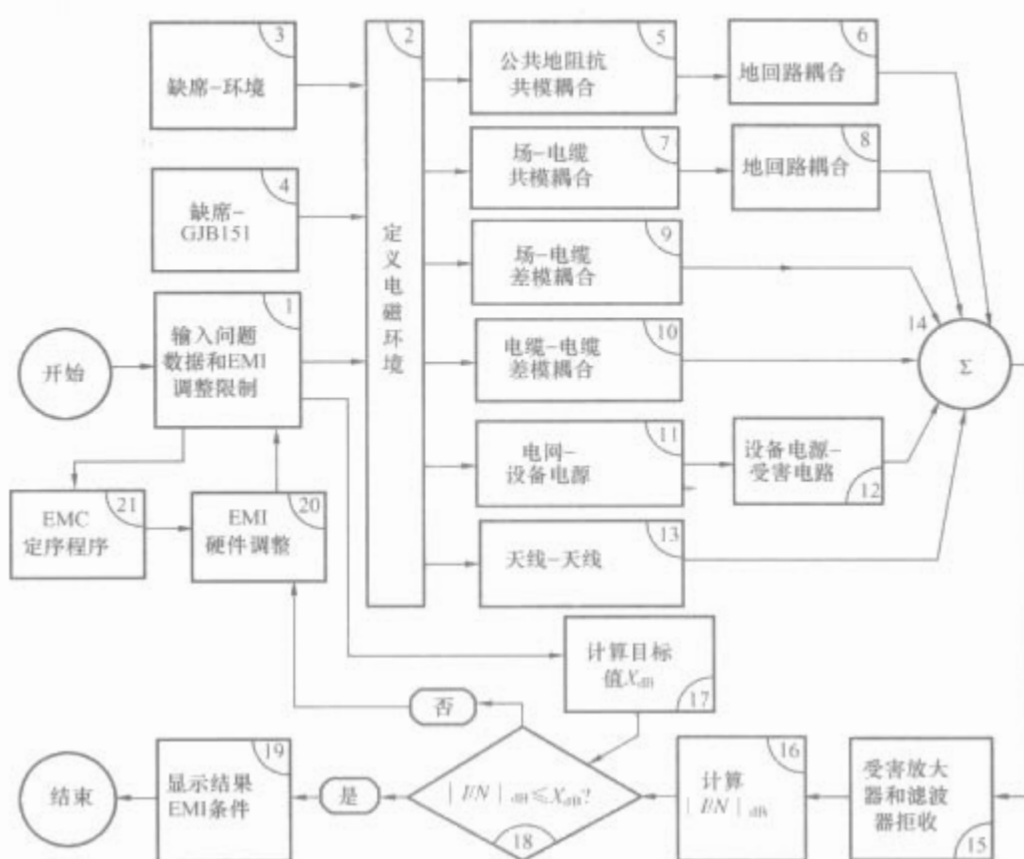


图 9.3-35 系统内预测和解决电磁兼容问题的分析方法和步骤

5.1.2 系统内电磁兼容分析方法

图 9.3-35 定性概述了系统内预测和解决电磁兼容问题的分析方法和步骤。首先，用户输入 EMI 问题数据，包括有用信号电平、接收器频率响应特性等。第二步是规定电磁环境，包括电场强度或磁感应强度、电压或电流以及其他定义辐射环境和传导环境的环境参数。第三步是处理一个或多个耦合途径（见图 9.3-35 方块 5、7、9、10、11 和 13）。如果 EMI 问题涉及的耦合路径不止一个，那么下一步就是求出受害接收器输入端上的干扰合成电压。虽然各个耦合路径产生的电压一般不同相，但是分析时可以按最坏情况（上界）考虑，可以把各个路径电压同相相加，求出合成电压。

计算出受害接收器输入端合成电压后，还需要考虑受害接收器的敏感度特性。模拟系统特性包括通带灵敏度、拐角或截止频率、阻带的衰减斜率和带外响应特性，数字系统特性数据通常是数字噪声安全裕度或抗扰度电平。计算有用信号 S 和干扰 I 后，确定受害接收器固有灵敏度 N 。然后计算干扰噪声比 I/N 和信号与噪声加干扰比 $S/(N+I)$ 。 I/N 是系统可能需要的 EMI 调整措施量的直接定量量度。

确定合适的 I/N 比对避免设计不足或过设计是很重要的。如果设计不足，干扰概率就会太高，以致不能接受；如果过设计，就会导致成本过高。如果 I/N 比不符合要求，就需要进行 EMI 调整，可以选择不同的 EMI 调整措施，一次进行一个调整，然后重复整个过程，确定新的 I/N 比。

5.2 系统间电磁干扰分析

在系统间情况，系统位于不同场地，系统间电磁干扰分析的主要耦合路径是天线-天线。在进行电磁兼容分析时，信号在天线间的传输常需要考虑各种因素的影响，如天线极化、天线高度、大气条件等。为了引入这些修正，已编制了系统间综合的信号与 EMI 预测表格，如图 9.3-36 所示。

电磁干扰预测表格					
信号源: _____ MHz; _____ W; 其他: _____					
潜在 EMI 源: _____ MHz; _____ W; 其他: _____					
受扰接收机: _____ MHz; 检波前带宽 _____ kHz; 基带带宽: _____ kHz					
	信号	标准差	干扰		
	dB	-dB	dB	dB	-dB
发射机(信号和干扰源)					
1. 有效发射功率(dB _m)	30		93		
2. 带外发射功率减少					64
3. 天线传输线损耗		2			0
4. 天线增益	35		30		
5. 带外频率增益减少					0
6. 接收方向增益减少					0
7. 有效辐射功率总的修正(1~6行之和)	63dB _m		59dB _m		
传播途径(信号和干扰源)					
8. 自由空间损耗(信号: km; 干扰: km)		140			110
9. 非瞄准轴修正损耗		0			0
10. 所需衰落裕量(%置信度)		30			
11. 雨、天蒸气、氧损耗		0			0
12. 总的传输损耗(将 8~11 行相加)		170			110
接收机(信号和干扰受扰情况)					
13. 接受天线增益	35		35		
14. 在 EMI 发射方向增益减少					45
15. 因极化产生的增益减少					
16. 天线传输线损耗		2			2
17. 总的天线增益或损耗(将 13~16 行相加)	33				12
18. 接收天线输入功率(将 7、12、17 行相加)	-74dB _m		-63dB _m		
19. 频率不对准修正					12
20. 带宽修正(频道基带)					0
21. 接收机灵敏度(RMS 噪声电平)	-98dB _m		-98dB _m		
22. 检波前 S/N 与 I/N(18~21 行代数)	26		35		
23. 调制噪声改善					
24. 视频/音频鉴别					
25. 输出的 S/N 与 I/N(将 22~24 行相加)	26		35		
26. 合成的 S/(N+I)(25行: 如 I/N>35/N-1/N)	-0				
27. 干扰余量: S/(N+I)标准差					
结论:					

图 9.3-36 系统间综合的信号与 EMI 预测表格

EMI 预测表格分为有意信号和潜在 EMI 发射机(1~7 行)、中间传播路径对信号和 EMI 的损耗(8~12 行)、受扰接收机输入(13~18 行)和以输出性能表示的通过受扰接收机的处理信号以及潜在 EMI(19~26 行)几类。最终的性能是 $S/(N+I)$ ，即信号与噪声加干扰之比。

把 $S/(N+I)$ 的分子与分母均除以接收机内部噪声 N ，再转换成 dB 可得

$$\begin{aligned} [S/(N+I)]_{\text{dB}} &= 10\lg\left(\frac{S}{N+I}\right) = 10\lg\left(\frac{S/N}{1+I/N}\right) \\ &\approx 10\lg\left(\frac{S}{N}\right) - 10\lg\left(\frac{I}{N}\right) \quad (9.3-89) \end{aligned}$$

所以，在分析时可以分别进行信噪比 S/N 预测和干扰噪声比 I/N 预测。其中， S/N 是被控制的设计参数，而 I/N 是存在 EMI 时的结果。若分析得到的 $S/(N+I)$ 不满足要求，则需要采取措施来降低 I/N 。



第 4 章 船舶电磁兼容设计

1 元器件选用

电子元器件的品种繁多、性能各异，实际元器件的特性往往偏离理想元器件的特性，设计各种电路时，合理选择和正确使用电子元器件，是实现电磁兼容性的基础。

1.1 电阻器

电阻器按功能可以分为固定电阻器和可变电阻器，实际电阻器的等效电路取决于制造工艺，图 9.4-1 为常用电阻器的等效电路。其中， R 是电阻器的电阻， C 是寄生旁路电容， L 主要是引线的寄生电感。与电阻器有关的常见电磁干扰问题见表 9.4-1。

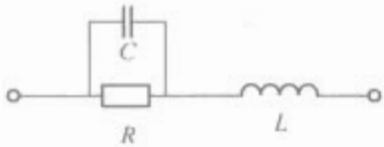


图 9.4-1 常用电阻器的等效电路

表 9.4-1 与电阻器有关的常见电磁干扰问题

电阻器特性	应用场合	可能引起的问题
端对端电容	衰减器	高频信号直通非接地点成为信号源
端对端和端对地电容	反馈放大器阳极负载电阻	相位漂移与信号成分为频率函数
电阻随频率变化	某些放大器，某些测量方法	Boella 和集肤效应
电感	衰减器中的分流电阻器	有效阻抗随频率变化，主要在 100MHz 以下的低值电阻器
电感	各种电阻器	相位移，有效阻抗变化，主要在 100MHz 以上
对射频场的敏感性	合成和金属膜电阻器	改变电阻和引起过热
对射频场的敏感性	普通螺旋缠绕电阻器	导致电压（与圈数成比例）和场强转移到电路

1.1.1 电阻器类型

合成电阻器外形小、价廉，但噪声较大、线性不好，应当避免在低电平高阻值（1MΩ）电路中使用。线绕电阻器具有感性和容性效应，不适用于 50kHz 以上高频场合。薄膜电阻器的高频特性最好，有效直流电阻直到 100MHz 仍然相当恒定，适合于对稳定性和阻值容差要求较高的场合。固定薄膜电阻网络的噪声很小，特别适用于小型化和电路中需要大量相同阻值的场合。

敏感电阻器是其特性（例如电阻率）对于温度、电压、光通、湿度、磁通、气体浓度和机械应力等某种物理量表现敏感的半导体元件，在电路设计中较常用的敏感电阻器是热敏电阻器和压敏电阻器。

1.1.2 电阻器的噪声

电阻器的噪声是直接影响电路性能的重要因素之一。线绕电阻器的噪声最小，合成电阻器的噪声最大，薄膜电阻器

的噪声远小于合成电阻器的噪声，但大于线绕电阻器的噪声。

(1) 电压噪声由热噪声和 $1/f$ 噪声两个独立部分构成

$$V_{\text{total}} = \sqrt{V_t^2 + V_c^2} \tag{9.4-1}$$

式中： V_t^2 为热噪声（Johnson 噪声），与温度、电阻值和噪声带宽成正比； V_c^2 是电流流过电阻器产生的噪声，与电流有效值的平方成正比，与频率 f 成反比。

(2) 电流噪声表示在电阻器上加直流电压时，电阻器所产生的交流分量，表 9.4-2 为各种电阻器的电流噪声水平。

表 9.4-2 各种电阻器的电流噪声

电阻器类型	线绕式	合成碳膜	碳膜	金属氧化膜	金属膜
电流噪声 ($\mu\text{V/V}$)	0.01~0.1	0.1~1.0	0.1~0.3	0.1~0.13	0.01~0.1

1.2 电容器

电容器是利用电场储存能量的电子元件。在电磁兼容设计中，常采用电容器为高频干扰提供低阻抗分流通路。图 9.4-2 为实际电容器的等效电路模型，其中， C 为电容器的电容量， R 和 L 为电容器的等效串联电阻（ESR）和寄生串联电感。与电容器有关的常见电磁干扰问题和排除方法见表 9.4-3。

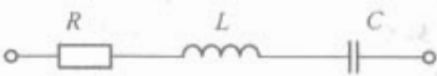


图 9.4-2 电容器的等效电路

表 9.4-3 与电容器有关的常见电磁干扰问题和排除方法

电磁干扰问题及原因	排除方法
电容器的引线起电感器作用，引线的有效电感太大会导致谐振问题	使用并联电容器，缩短回流导体的长度，尽量靠近进线导体，使用同轴线或带状线并与回流导体紧靠，使用同轴型或表面安装电容器
温度和电压应力组合引起电介质击穿，会产生内部尖峰信号	大多数电容器将永久损坏，应当使用几个电容器串联来减小应力，如钽箔自愈电容器可能有所帮助
由于被银层与电介质的假附着使电容量随机和突然变化引起脉动干扰或闪烁现象，可导致间歇现象，使射频电容器（例如被银云母、被银陶瓷电容器）产生随机噪声	制造者应避免这种情况
电压浪涌大于工作电压或超过温度额定值，电解电容器会产生闪烁现象	保证电压源浪涌低于额定值
电介质应力的释放，尤其是聚苯乙烯和石英电介质在甚低频充、放电期间产生噪声脉冲	在低频避免使用聚苯乙烯和石英电介质，液体电介质可以减小影响

续表

电磁干扰问题及原因	排除方法
接入使用之后,塑料电介质(如聚苯乙烯)的连续聚合,应力会引起噪声脉冲	使用其他电介质
光、放射性微粒和 X 射线在电介质上产生离子作用,在聚乙烯、石英和云母电介质电容器中(尤其是小电容个体)可能产生噪声	屏蔽或其他方法
由电容、电感及物理特性构成谐振,在某些频率上泄漏或者吸收能量	完善设计和屏蔽

1.2.1 电容器的类型

瓷介电容器通常分为 I 型(高频)和 II 型(低频)两大类,是应用最多的一种电容器。独石电容器是一种小型化瓷介电容器,常用于集成电路的外围分立元器件和要求小型化的电子设备中。金属化纸介电容器以电容器纸上蒸发的一层金属薄膜为电极,有自愈能力,适用于直流或脉动电路,但电压低于额定值时绝缘特性不好。塑料薄膜电容器中涤纶电容器产量较大、应用最广,其电容量和耐压范围很宽,不宜作交流功率电容器,常用于环境温度 80℃ 以下的直流和脉动电路。云母电容器损耗小、不易老化、精度较高,常用于高频电路中,并可作标准电容器,但抗潮湿能力较差。漆膜电容器是一种具有高可靠性的电容器,频率特性很好,常用在低电压、大容量电子设备中。玻璃釉电容器特别是独石型的玻璃釉电容器在潮湿环境中的稳定性和抗振性能很好,适合于海上环境使用。

常用的电解电容器有铝电解电容器及钽、铌电解电容器。铝电解电容器价格便宜、品种齐全,应用十分广泛,但漏电流和损耗较大。钽、铌电解电容器价格昂贵,电容量较小且工作电压较低(120~160V),但性能稳定,在电子线路中广泛使用。

1.2.2 电容器的选择

(1) 工作频率是选择电容器的重要依据。各种电容器的可用频率范围,高端受自谐振频率和高频电介质损耗的限制,低端由实际最大可用电容值确定。表 9.4-4 给出了各种电容器的可用频率范围。

表 9.4-4 各种电容器的可用频率范围

电容器类型	最低频率 (可扩展应用)	最高频率 (可扩展应用)
铝电解	0Hz	1kHz(200kHz)
钽电解	0Hz	1kHz(500kHz)
纸和金属化纸	100Hz	100kHz(5MHz)
聚酯薄膜	1kHz(100Hz)	4MHz(10MHz)
高 K 陶瓷合金	5kHz(500Hz)	100kHz(100MHz)
聚苯乙烯	10kHz(1kHz)	10MHz(10GHz)
云母、玻璃和低损耗陶瓷合金	100kHz(1kHz)	100MHz(10GHz)

在滤波电容器中,为了减小电感 L ,除尽量减小电容器引线长度外,可在电容器上提供单独的输入和输出引线,把电容器转变成三端元件(见图 9.4-3)以提高电容器的串联谐振频率。穿心电容器(也称馈通电容器)的频率可扩展到 1GHz 以上,常用于抑制电磁干扰和屏蔽的界面处。在传导敏感度和传导发射测量中,常用 10 μ F 穿心电容器作电源线滤波。

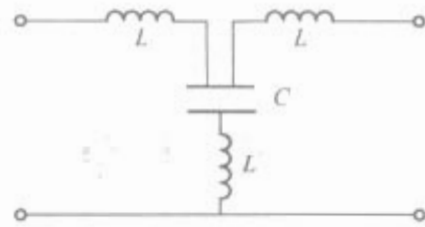


图 9.4-3 三端电容器 T 形电路

(2) 根据安全要求,用作电源干扰抑制的电容器,线—线应该满足 X 级安全额定值,而线—地应该满足 Y 级。特别是 Y 级电容器失效将引起电气危险,所以对这些电容器的要求较严格。电源干扰抑制电容器的耐压要求见表 9.4-5。

表 9.4-5 电源干扰抑制电容器的耐压要求

电容器作用	经受 1min 的应力电压试验(U_R 为线电压)	
	引线与引线	引线与机壳
Y 级电容器	DC2250V 和 AC1500V(50Hz)	DC1500V+2 U_R
X 级电容器	4.3 U_R (DC)	DC1500V+2 U_R

1.3 磁性元件

磁性元件包括各种类型的电感器、变压器和磁耦合元件。

1.3.1 电感器

电感器是利用磁场储存能量的电子元件,可分为空心和磁心两种,磁心电感器又可分为开路和闭路两类。电感器的等效电路如图 9.4-4 所示,其中, L 为电感器的电感量, R 和 C 为导线的串联电阻和绕线间的分布电容。与电感器有关的常见电磁干扰问题和排除方法见表 9.4-6。

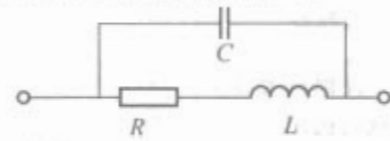


图 9.4-4 电感器的等效电路

表 9.4-6 与电感器有关的常见电磁干扰问题和排除方法

电磁干扰问题及原因	排除方法
在电感特性和电容特性引起的谐振频率上信号出现直通或阻断现象	修改电路的设计参数
涡流集肤效应电阻或磁滞损耗使功率耗散超过额定值	选用 Litz 导线或空心线圈
线圈的分布电容使电感器的高频有效电感增加	减小分布电容或允许高涡流效应以减小有效电感
线圈与线圈、导线或其他电路元件靠近产生互感干扰	隔离、屏蔽或使线圈平面正交
接通、切断电路或负载变化时,电感器电流突变产生的电压瞬变现象	采用电磁继电器、吸收电容或涌浪吸收装置

1.3.1.1 电感器的谐振和饱和问题

(1) 自谐振频率是电感器电感 L 与分布电容 C 的并联谐振频率

$$f = 1/(2\pi \sqrt{LC}) \quad (9.4-2)$$

频率高于电感器的自谐振频率时,电感器的阻抗呈电容特性。即使频率低于电感器的自谐振频率时,寄生电容也会影响电感器的性能,一般在 1kHz 以上电感器的有效电感会大于其额定电感。

(2) 对磁心电感器而言, 电流增加会引起磁心的饱和, 饱和电流一般定义为引起磁导率减小 5% 的直流电流值。增大磁心截面以及使用有气隙或开槽的磁心, 可以提高饱和电流。对于直流分量很大的单向电流, 也可以通过提供反向的直流磁场“补偿”来降低磁心的饱和程度。

1.3.1.2 应用考虑

(1) 杂散磁场是电感器的一个重要特性。一方面, 电感器漏磁产生的杂散磁场会污染环境; 另一方面, 环境中的杂散磁场也会对电感器形成耦合干扰。理想的闭路磁心电感器是环状铁氧体珠(环), 但一般仅用于电感较低的情况。不同电感器的杂散磁场会形成感性耦合, 使磁场互相垂直以及增加电感器距离是减小感性耦合的有效方法。减小杂散磁场也可以采用磁场屏蔽, 一般低频采用高磁导率材料, 高频采用良导体。

(2) 静电屏蔽可防止电感器的高电压对邻近电路产生电场耦合, 应采用良导体且必须接地或接在电感器的近地端。

(3) 电感器是许多 EMI 滤波器的关键元件, 采用双线并绕方式的电感器被用作共模扼流圈。射频阻塞扼流圈是一种专用于电磁干扰的电感器, 典型值为 20~1000 μH, 在 10kHz 到几兆赫范围内可以有效阻止地环流。

1.3.2 变压器和磁耦合元件

变压器和磁耦合元件都是以磁通的形式将能量从一个电路转换到另一个电路的器件, 常用的变压器和磁耦合元件包括下列几类。

1.3.2.1 电源变压器

电源变压器分工频(50Hz 或 400Hz) 和 高频(15~300kHz) 两类。前者主要用于电压变换、电源隔离和减小电磁干扰, 后者主要用于开关电源。

分布电容会引起变压器一次和二次之间不希望的共模和差模耦合, 可以采用法拉弟屏蔽减小分布电容的耦合。单层屏蔽的隔离变压器可使一次和二 次的剩余电容小于 1pF, 双层或三层法拉弟屏蔽可使剩余电容小于 0.01pF。特殊的绕组结构, 一、二次绕组分段放置或增加绝缘厚度也可以减小分布电容, 但会增加变压器的漏磁场。

1.3.2.2 信号和脉冲变压器

从音频到视频范围, 信号和脉冲变压器使用非常广泛, 一般用于中断地环路并实现电流隔离、触发电力半导体器件、隔离直流分量、阻抗匹配和平衡与不平衡变换, 与电磁干扰有关的特性是其分布电容和有效带宽。

1.3.2.3 抗干扰变压器

传输低电平信号的变压器容易受外部磁场干扰, 采用环形磁路和对称绕组, 可以提高抗磁场干扰的能力, 这种变压器统称为抗干扰变压器。

1.3.2.4 隔离变压器

“隔离变压器”一般指变比为 1 的变压器。除自耦变压器外, 任何变压器都能提供一次和二次之间的隔离, 使直流耦合降为零并隔断电路之间的接地环路。当频率较高时, 变压器的分布电容会降低接地环路的阻抗, 使共模干扰电流增大。

1.3.2.5 中和变压器

隔离变压器断开接地环路的方法, 对直流电路和频率很低(如低于 50Hz) 的电路不适用, 此时可采用图 9.4-5 所

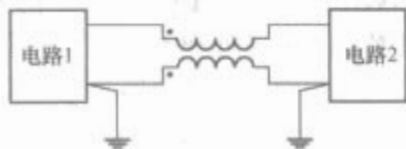


图 9.4-5 中和变压器的连接形式

示的中和变压器的连接形式。中和变压器可以使大于转折频率的共模干扰每十倍频程降低 20dB, 其转折频率为

$$f = R / (2\pi L) \tag{9.4-3}$$

式中: R 为地回路电阻, L 为中和变压器的电感。

1.3.2.6 铁氧体珠

铁氧体珠是可以套在导线上的磁心环, 一般起有耗电感的作用, 呈现 10~100Ω 的电阻。铁氧体珠以串联插入损耗工作, 对低阻抗电路(50Ω 或 75Ω) 非常有效, 对高阻抗电路无效, 一般工作频率低于 10MHz。

1.4 开关和继电器

“开关”指所有能接通或断开电路的机电元件, 继电器和断路器也是一种开关。“理想”开关的电流和电压变化为阶跃函数, 但由于电路中电感和电容的作用, 一般为包含一定振荡的指数变化过程, 是一种“振铃”波。大电流感性负载断开瞬间的过电压常采用钳位器件抑制, 而直流电容一般采用预充电路避免电流冲击。

1.4.1 机械开关

用机械开关接通和断开电路时, 会在开关触点发生电弧, 是一种潜在的宽带频谱干扰源。机械开关触点的随机抖动会导致电流扰动, 开关瞬态与负载电路产生的振荡会产生高频 EMI 问题。表 9.4-7 为不同负载对开关触点的要求, 容性负载在接通时引起过电流, 而感性负载在断开时引起过电压。在某些应用中, 为了减小触点金属表面的烧蚀, 应使用水银开关。

表 9.4-7 不同负载对开关触点的要求

负载类型	对开关触点的要求
电阻性负载	电流额定值为 V/R , R 是在最低温度下的电阻值
白灯负载	接通时, 冷钨丝电流为额定工作电流的 10 倍
容性负载	电容充电电流 Cdu/dt 仅受源内阻的限制, 电动机和变压器也有寄生电容
感性负载	电感感应电压 Ldi/dt 在断开瞬态可引起过电压和电弧, 并使相邻触点疲劳
电动机负载	绕组电容和启动转矩使启动电流为稳态电流值的 5~10 倍

1.4.2 继电器

继电器是一种可由独立控制电路来遥控一个或多个电路开关的器件, 继电器分为电磁继电器和固态继电器两种。

1.4.2.1 电磁继电器

电磁继电器的电磁干扰问题多发生在激励器和触点电路。电磁螺线管的电感较大, 中断电流瞬间会产生 10~20 倍的反向电动势。触点通断时产生的电弧也可能对其他电路形成传导和辐射干扰。继电器线圈和供电导线可能感受到环境场的干扰, 强射频环境下控制线受到的感应噪声可能错误触发继电器。表 9.4-8 给出了一些与电磁继电器有关的电磁干扰问题和排除办法。

表 9.4-8 与电磁继电器有关的一些电磁干扰问题

电磁干扰问题及原因	排除方法
继电器控制电路对环境产生电磁干扰, 同时也对外界的射频电磁干扰敏感	对电源线进行绞合、屏蔽和滤波, 用金属材料封闭继电器

续表	
电磁干扰问题及原因	排除方法
衔铁动作引起线圈磁路变化,变化的触点产生 di/dt 和 dv/dt , 导致线圈或触点电路发生问题	正确设计继电器电路,增加滤波器
继电器触点振动产生电磁干扰	正确设计继电器结构或触点电路抑制
感性电路的高电压导致半导体器件噪声、误动作或永久性损坏	适当增加元件的额定值或进行分压、抑制
信号电路中的低频干扰	采用单点接地和双绞导线
信号电路中的高频干扰	采用多点接地

在触点闭合时衔铁易产生抖动,小型继电器可能出现 $10\sim 50\mu\text{s}$ 的抖动,大型继电器在几毫秒内会反复抖动若干次。触点抖动可能引起数字系统数据错误,常使用极性或封锁式继电器。“消颤”网络可以合并并在逻辑电路中,也可以使用水银接触或真空管等特种继电器。

1.4.2.2 固态继电器

固态继电器 (SSR) 是一种无触点电子开关,无运动部件和触点,采用分立半导体器件、集成器件及微电子技术实现控制回路与负载回路之间的电隔离及信号耦合,一般由输入电路、驱动电路和输出电路三部分组成。固态继电器按其输出功能分为直流型、交流非过零型和交流过零型三类,隔离方式有光隔离和变压器隔离。

1.4.2.3 应用考虑

继电器的工作寿命随电路切换电流增加而缩短,一般产品标准给出阻性负载的基本额定值。钨丝灯在冷却状态的电阻比白炽状态小得多,感性负载断开时会感应瞬态电压,为保护继电器触点和尽量减小射频干扰,应当对负载进行瞬态抑制。

1.5 连接器

连接器是提供两电路之间电气连续性的无源器件。

1.5.1 连接器的交抗

交抗是两个相互靠近的电路之间电容或电感的耦合。连接器中的容性交抗定义为

$$X_{\text{dB}} = 20\lg(V_1/V_2), Z = V_1/I_2 \quad (9.4-4)$$

式中: X_{dB} 为连接器的容性交抗; Z 为感性交抗的耦合阻抗(传输阻抗); V_1 为受干扰插脚上的噪声电压; V_2 和 I_2 为干扰插脚上的噪声电压和噪声电流。如果受干扰插脚被 n 个“干扰源”插脚围绕,对于非相关的干扰信号,交抗增加 $n^{1/2}$ 倍;对于相关的干扰信号,最大交抗可能增加 n 倍。

1.5.2 阻抗匹配和平衡

为避免性能降低,连接器和传输线应具有相同的特性阻抗。在低频时,这种因素影响较小;当连接器长度达到信号波长的 $1/10$ 时,阻抗的偏离将引起反射和振铃。连接器导致性能降低的另一个因素是线对地不平衡,一般双导线的线到地或线到屏蔽有 3% 的不对称,连接器应具有更好的平衡特性。

1.5.3 接触阻抗和插入损耗

连接器接触可能直接引起电弧,接触阻抗可能导致驱动电路电压变化,连接器接地路径中的接触阻抗还会形成外部源的共阻抗耦合。接触直流电阻一般在毫欧范围,从最好的 $0.1\text{m}\Omega$ 到最差约 $10\text{m}\Omega$ 。接触不良的另一种 EMI 效应,是

由于连接器的腐蚀或老化恶化形成非线性结,使两个方向的阻抗不同,并引起干扰的检波效应和内部信号的失真。

1.6 电缆和光纤

互连电缆可分为同轴电缆、带状电缆和双绞线三种基本类型,光导纤维的数据传输网络在通信和控制领域也广泛使用。

1.6.1 同轴电缆与屏蔽双绞线

单点接地的同轴电缆,对容性感应可提供良好的保护。在两层屏蔽之间具有绝缘的双重屏蔽电缆(三同轴电缆),可使噪声电流在外层屏蔽中流动,而信号电流在内层屏蔽中流动,从而消除屏蔽层电阻产生的噪声。屏蔽双绞线具有三同轴电缆类似的特性,非屏蔽双绞线只提供极少的容性感应保护,但对磁性感应保护极好。屏蔽双绞线高于 1MHz 损耗大大增加,同轴电缆高于 100MHz 损耗变大,对于几百 MHz 的信号波导比较适用,各种传输线的可用频率范围见表 9.4-9。

表 9.4-9 各种传输线的可用频率范围			
电缆类型	双绞线和屏蔽双绞线	同轴电缆	波导
频率范围 (可扩展应用)	$0\sim 100\text{kHz}$ (10MHz)	$0\sim 100\text{MHz}$ (1GHz)	$>100\text{MHz}$

1.6.2 带状电缆

圆导体带状电缆常用于电子计算机、仪器仪表及其他电气设备间作多组信号连接,使用中主要问题是信号线与相应地线的配置方式。

(1) 全部信号线使用同一根导线为地线可以使所需要的导线数减至最少,但使远处信号导线和地线之间产生大的回路面积,容易产生辐射和敏感问题,不同信号之间会产生共地阻抗耦合,因此不常使用这种形式。

(2) 每根信号线使用单独的靠近它的地线可使回路面积、共阻抗耦合和导线间的交抗最小,但要求的导线数成倍增加。

(3) 每两根相邻信号线共用一根地线,导线数量比单独地线可减小约 $1/4$,但存在一定的共阻抗耦合和交抗,一般适用于要求不太高的场合。

(4) 在带状电缆中包括一个跨越电缆宽度的金属平板地平面,回路面积由信号导线和接地平板间距确定,回路面积很小。但这种电缆端接比较困难,实际使用较少。

1.6.3 光纤光缆

光缆是以光纤为传输单元的线缆,一般都含有若干电线和加强元件及必要的护套。光纤系统基本不受地电位和环境 EMI 干扰,也不辐射 EMI,无交叉干扰。光纤通信系统主要包括光发送器、光纤光缆传输系统和光接收器三个部分。可以立即取代普通导线电缆的插头—插头相兼容的光纤连接器,通常由一对光电变换器和几十米到几千米的光纤组成一个整件。

1.6.3.1 光纤的电磁干扰防护措施

虽然光纤连线自身可以提供最好的抗扰度,但在驱动器 and 接收器附近的数字组件必须提供高水平的 EMI 隔离,发送器、接收器和数字、模拟处理电子装置都应进行屏蔽。

如果采用金属编织铠装或含金属芯线的综合光缆,这些导线会影响互连设备之间的电隔离。虽然它们对光纤不产生任何交叉干扰,但可能在发送器或接收器电子装置产生常见

的共模电流环路问题,一般应使用隔离变压器实现共模抑制。

1.6.3.2 光纤传输系统的防辐射措施

光纤传输系统在核爆炸期间,可能引起严重的瞬态或永久性效应。最关键的部件是光纤本身和光检测器,加固系统是性能和抗扰度的折中。加固的接收器一般灵敏度都较低,耐辐射光纤可以使衰减从几 dB/km 增加到数千 dB/km。

1.7 模拟和逻辑器件

无论是干扰源或是受害者都与有源模拟和逻辑器件密切相关,各种基本 IC 集成芯片有其固有的 EMI 特性,必须保证“片内”的电磁兼容性。

1.7.1 敏感度门限值的确定

接收和处理信号的各种集成电路或器件,可以分为带通型的调谐器件和低通型的基本频带器件两大类,在器件的额定频率范围内或外都会出现 EMI 问题。

1.7.1.1 带内敏感度

灵敏度 N 和带宽 B 是评价系统的两个最重要的参数,灵敏度越高、带宽越大,接收器带内 EMI 影响就越大,器件带宽与器件输入噪声的比值定义为接收器的敏感度指数(RS)。敏感度指数愈大,EMI 敏感度也愈大。

模拟(线性)器件的灵敏度以固有噪声为基础,是信号等于内部噪声时的最小可识别信号。数字(两态)器件是一种“门限”或两态器件,最小可识别信号与器件的输入电阻无关,而是由触发所需的最小电压(噪声安全裕度)决定。

1.7.1.2 带外敏感度

许多敏感器件的 EMI 问题存在于带外而不是带内,模拟和数字器件的带外特性由灵敏度与频率关系的斜率(或减小)来定义。在截止频率以上,放大器的增益下降可采用每倍频程或每 10 倍频程增益下降的 dB 数表示

$$\begin{aligned} 1(\text{dB}/10 \text{ 倍频程}) &= \lg_2(10)(\text{dB}/2 \text{ 倍频程}) \\ &= 3.32(\text{dB}/2 \text{ 倍频程}) \end{aligned} \quad (9.4-5)$$

实际上,旁路电容经常是引起阻带性能降低的原因,它相当于一低通滤波器,呈现 20dB/10 倍频程的规律。

1.7.1.3 音频整流现象

音频整流现象可以由任何有源器件呈现的非线性引起。例如,当受扰设备由于带外发射的过激励,RF 载流子在发射极—基极结进行整流,而且载流子经过低容抗到地,如同超外差中第二极波器,使调制包络解调或者恢复,并通过放大器处理。音频整流现象可以说明雷达为什么可以干扰计算机,或者居民区的发射机可以在立体声放大器中引起 EMI。

1.7.2 晶体管噪声和电磁干扰

晶体管是模拟或数字组件的基本结构单元,其固有 EMI 特性至关重要。本征半导体的噪声限制了最小可探测的信号,而晶体管内部电阻、电容和传输时间则限制了最高可放大频率。图 9.4-6 为放大器的输入噪声特性, R 是信号源的内阻,放大器等效的输入噪声密度为

$$V_{nt} = \sqrt{e_R^2 + V_n^2 + (I_n R)^2} \quad (9.4-6)$$

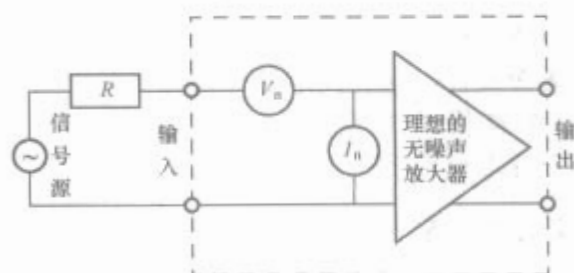


图 9.4-6 放大器的输入噪声

式中: e_R 为信号源内阻 R 的电压噪声密度; V_n 和 I_n 为放大器中晶体管产生的输入电压噪声密度和输入电流噪声密度。

1.7.3 模拟器件

模拟器件可通过传导和辐射两种途径引起 EMI 问题,主要发生在以极低信号电平工作和含有高增益放大器的电路中。模拟放大器通常用来处理极低的信号,运算放大器采用平衡输入方式具有减小 EMI 的优点。级联放大器的噪声系数主要由第一级高增益器件的噪声系数确定。

1.7.3.1 模拟放大器

(1) 运算放大器的增益随频率增加而迅速减小,一般采用增益带宽积(BW)来表征。设放大器的增益为 G ,截止频率为 f_{CO} ,如果 EMI 信号的频率 f_{EMI} 在带内,则以因数 G 放大;如果 EMI 信号在带外,则以因数 $G \times f_{EMI}/f_{CO}$ 放大,放大将一直持续到出现单位增益的 f_{EMI} 单位为止。理想情况,对更高频率放大倍数应小于 1 并不断减小,但由于寄生谐振和音频整流,实际上不可能无限降低。

(2) 翻转速率限制主要由放大器内部电容或外部负载随电压变化的充、放电决定,在数字逻辑电路中影响更加明显。

1.7.3.2 其他模拟器件

(1) 隔离放大器是可以提供输入和输出之间的高隔离度,一般采用变压器耦合或光耦合技术。普通运算放大器不允许共模输入电压大于它的电源电压,而隔离放大器的输入和输出端之间可承受数千伏电压。

(2) 数字—模拟变换器(D/A)典型的 EMI 现象是输出不符合数字容量,主要原因是运算放大器对共模传导 EMI 抑制不良引起参考地的波动、电源电压波动、加权网络的电压基准波动或强 RF 干扰引起的音频整流和直流位移。

(3) 模拟—数字变换器(A/D)典型的 EMI 现象是数码输出与输入不符合,设计时应将模拟部分与数字部分分开,以避免数字开关的瞬态电流流进模拟部分而引起地电位波动,另外电源插脚必须去耦。

(4) 电压—频率变换器是 A/D 变换器的一种形式,它产生一连串幅度恒定、频率与输入幅度成正比的脉冲输出,特别适用于模拟变量经由电缆、光纤和无线电进行远距离传输,防护措施和常规的 A/D 变换器类似。

(5) 线驱动器和接收器虽然以模拟放大器为基础,但更切合于“门限”或两态器件种类,广泛应用于数字逻辑电路的对接。

1.7.3.3 模拟器件的发射

除非过激励或超出它们的动态范围使用,模拟电路一般不会产生大量辐射发射或传导发射,但发射机电路、功率放大器和电动机控制电路可能产生不希望的大能量 EMI 发射。

1.7.4 逻辑器件

逻辑器件是两态器件,敏感度门限由触发器件从一种状态到另一种状态所需要的最小能量来确定。由于一般逻辑器件的带宽都大于 1MHz,高频 EMI 发射问题较严重。虽然逻辑器件对窄带 EMI 的抗扰度比模拟器件大,但由于它占有极大的带宽,对宽带干扰比模拟器件更加敏感。

1.7.5 电子管

在高电压、大功率和微波应用中,电子管仍然是主要的有源器件。电子管噪声主要包括散粒效应、电流分配噪声、感应噪声、气体噪声、二次发射噪声、闪烁效应和灯丝噪声(交流声)等,电子管及其电路的电磁兼容性问题与晶体管相类似。

1.8 印制电路板

印制电路板 (PCB) 设计准则应符合 GB 4588.3-2002 《印制板的设计和使用》。

1.8.1 单面板

单面板制造简单, 装配方便, 适用于一般电路要求。

(1) 细而长的回路导线呈现高电感 (典型 10nH/cm), 其阻抗随频率增加而增加。如果设计处理不当, 将引起共阻抗耦合干扰。

(2) 辐射发射的控制必须在线路板设计的初始阶段就予以充分考虑, 应遵循下列原则。

1) 在安全条件下, 电源线应尽可能靠近地线以减小差模辐射的环面积, 也有助于减小电路的交扰。减小时钟线、信号线与地线的距离, 可以缩小环路面积。

2) 包含快速、中速和低速逻辑电路的电路板应按逻辑速度进行分割, 高速的器件应安放在紧靠边缘连接器范围内, 而低速逻辑和存储器, 应安放在远离连接器范围内。

3) 应避免印制电路板导线的不连续性, 迹线宽度不要突变, 导线不要突然拐角。

1.8.2 双面板

双面板适用于要求中等组装密度的场合, 安装在这类板上的元器件易于维修或更换, 也有利于实现电磁兼容性设计。在高速数字电路中, 应该把印制导线作为传输线处理。常用的印制电路板传输线是微带线和带状线, 其特性阻抗为

$$Z_c = \frac{87}{\epsilon_r + 1.41} \ln \left(\frac{5.98h}{0.8w + t} \right) \quad (9.4-7)$$

式中: Z_c 为微带线的特性阻抗, Ω ; w 和 t 为印制迹线的宽度和厚度, mm ; h 为迹线与接地面间电介质的厚度, mm ; ϵ_r 为介质的相对介电常数。

1.8.3 多层板

多层板能更好地避免共阻抗耦合、改善屏蔽性能和降低多电平信号的交扰, 对高速逻辑电路使用单层或双面板不能满足电磁兼容性要求时, 应该考虑采用多层板。一般电源和地线层位于多层板的中部, 除一些贯通孔外是一个整体的平面, 不仅可形成一个低阻抗的电源分配系统, 并且还可起到辐射干扰的屏蔽作用。各互连层位于多层板的外侧, 可以与电源或地线层构成微带线, 能严格控制阻抗。互连层中相关的连线应相互成 90° 正交, 以减少互连板间的交扰耦合。

2 电力电子设备的设计

电力电子变流设备因其高效的电能变换能力和灵活的控制能力, 在国民经济的各个领域获得了广泛的应用, 但电力电子器件的开关工作方式产生的电磁干扰会使设备或系统的可靠性下降, 必须对其进行有效的电磁兼容性设计。

2.1 电力电子器件

广义的电力电子器件包括电真空管和半导体器件。从 20 世纪 50 年代以来, 真空管仅在频率很高 (如微波) 的大功率高频电源中使用, 而电力半导体器件已取代了汞弧整流器、闸流管等电真空器件。因此, 电力电子器件也专指电力半导体器件。

2.1.1 电力电子器件的特征

同处理信息的电子器件相比, 电力电子器件处理电功率 (可承受的电压和电流) 的能力远大于处理信息的电子器件, 一般工作于开关状态且需要安装散热器。

2.1.2 电力电子器件的分类

电力电子器件可以分为不可控器件、半控型器件和全控型器件三类。不可控器件主要指电力二极管, 导通和关断由其在主电路中承受的电压和电流来决定; 半控型器件主要包括晶闸管及其部分派生器件, 控制信号可以控制其导通, 而关断由其在主电路中承受的电压和电流决定; 全控型器件通过控制信号既可控制其导通、又可控制其关断, 主要包括绝缘栅双极晶体管 (IGBT)、电力场效应晶体管 (Power MOSFET)、门极可关断晶闸管 (GTO)、MOS 控制晶闸管 (MCT) 以及电力晶体管 (Power BJT)。

2.1.3 电力电子系统的组成

电力电子系统由控制电路、驱动电路和以电力电子器件为核心的主电路组成, 如图 9.4-7 所示, 包括主电路、控制电路以及检测、驱动和保护电路几个部分。

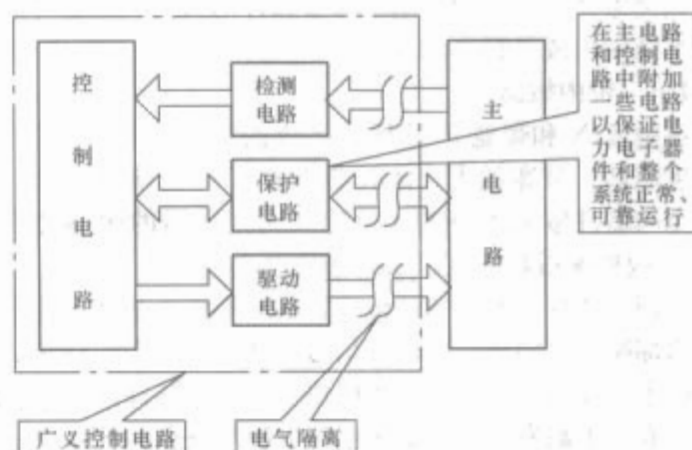


图 9.4-7 电力电子器件的系统组成

2.2 直流电源设备

直流电源指电力电子设备输出为直流的电路, 包括直流变换电路和整流电路。在直流变换电路只改变直流电压幅值和极性, 不产生电能形式的变化, 而整流电路 (AC/DC) 指能够将交流电能转换为直流电能的电路。

2.2.1 直流变换电路

直流变换电路按输入、输出电压关系可分为降压式电路、升压式电路和升降压式电路, 按器件开关方式又可分为硬开关电路和软开关电路。直流变换电路常用于构成直流脉冲调速电源和开关电源。

2.2.2 整流电路

整流电路广泛用于直流电源装置, 按照电路中变流器件开关频率的高低可分为低频和高频两大类。前者指采用不可控或半控型功率器件构成的传统相控整流电路, 后者指采用全控型器件构成的 PWM 斩控式整流电路。

作为电力电子装置与公共电网接口的整流电路, 其理想状态应同时满足: 网侧功率因数为 1, 负载侧电压恒压或输出电流恒流, 能实现输出电压的快速调节且具有双向传递能量的能力。传统相控式整流电路无法实现整流电路的理想状态, 采用全控型器件组成的 PWM 斩控式整流器却可以在不同程度具备上述功能。网侧功率因数校正技术 (PFC) 是设法使网侧电流正弦化, 并保持与网压同相。早期的 PFC 侧重于采用无源元件, 这类技术泛称无源功率因数校正技术 (PPFC); 随着技术的发展, 有源功率因数校正技术 (APFC) 已逐渐成为 PFC 的主流。

2.3 交流电源设备

交流电源指电力电子设备输出为交流的电路, 包括交流

变换电路和逆变电路。交流变换电路(AC/AC)可以改变交流电能的频率和幅值,逆变电路(DC/AC)能够实现直流电能到交流电能的转换。

2.3.1 交流变换电路

交流变换电路广泛用于电动机的调速系统,根据变换参数不同可分为电压变换和频率变换两大类,前者也称为交流调压电路,后者一般兼有变频调压功能也称为变频电路。频率变换又分为间接变频和直接变频两种结构。间接变频包括整流和逆变两次变换,也称含直流中间环节的变频电路,电路结构简单、技术也较成熟,已得到广泛应用。而直接变频是指无直流中间环节的一次变换结构,结构复杂、技术不成熟,尚未得到广泛应用。

2.3.2 逆变电路

逆变电路用于需要直流电源向交流负载供电的场合。按直流电源侧滤波器的形式,逆变电路可分为电压源逆变电路和电流源逆变电路两类。前者直流侧并联大电容,既抑制直流电压纹波,又为来自交流侧无功电流的流传提供通路;后者在直流侧串联大电感,既抑制直流电流纹波,又为来自逆变侧的无功电压分量提供支撑。

早期的逆变电路控制策略中,被控量都是输出电压,以求得到纯正的正弦波电压。电压跟踪型PWM技术是应用最为广泛的控制技术,但这种技术自身也存在很多缺点。例如在电动机驱动系统中,电动机负载不能得到快速的电流和力矩响应,系统难于达到高性能。电流跟踪型控制策略是控制电动机的电流,促使其输出正弦波电流,不仅可获得快速的力矩响应,还有较强的过载能力,从而解决传统PWM技术存在的问题。

2.4 电力电子设备的电磁兼容性

电力电子设备的开关工作方式会产生较强的电磁干扰,为抑制干扰、保证设备和系统稳定可靠的工作,必须按电磁兼容性指标进行生产。

2.4.1 谐波的危害

电力电子设备运行时会在交流侧产生电流、电压谐波,并通过传导和辐射的形式影响邻近弱电系统和连接于同一电网的电气设备,严重时会使这些设备或系统不能正常运行。电力电子设备的典型谐波效应包括:使邻近无线电设备、通信系统受到干扰;使受馈的直流电动机类负载产生附加发热、噪声或换相恶化;使位于近处或接于同一电网的控制设备失效;使改善功率因数的并联电容器发生过载,导致电容器的过热和击穿;引起仪表读数的误差;当交流侧出现直流分量时,使变流变压器出现直流磁化分量和中线过载;当出现“次谐波”电流时,输出电压将发生波动,致使作为负载的电灯或其他设备的参数也发生波动。

2.4.2 谐波的抑制

如果注入电网的谐波电流及电压谐波因数超过规定,则需要对谐波进行抑制,谐波的抑制和消除可以从电网、变流装置本身和附加设备三个方面予以考虑。

(1) 在设计和实际应用中,尽量选取较高的短路比是抑制谐波干扰的有效措施。在相同延迟角的情况下,或变流装置容量一定时,增大系统的短路容量可以降低电压谐波因数,也可以通过提高电压等级或采用专线和专用变压器给大功率变流装置供电。

(2) 从变流装置本身来看,增加变流装置输出的脉波数是减小谐波电流的有效措施。若脉波数大于12,要考虑投资和维修带来的影响,应控制使用。若脉波数大于36,对减小谐波已无明显效果,不宜使用。变流装置应避免在深控

状态工作,以减小谐波电流;可以在变流装置网侧装设调压分接头,由空载到满载能够切换选择电压。延迟角不对称将增大非特征谐波,在大型变流装置中,对延迟角的对称性有严格的要求。

(3) 附加设置滤波器设备或用电力有源滤波器向系统注入谐波电流以滤除高次谐波。无源滤波装置通常包括几个单调谐的并联滤波器,在不能满足要求的情况下,还需加一个高通并联滤波器。单调谐滤波器的滤波对象是幅值较大的5、7、11、13次奇次谐波中的某一次谐波;如果偶次谐波较大,也可设置偶次滤波器;高通滤波器主要用于滤除17、19、23、25等高次谐波。一般设计滤波器时应兼顾无功补偿的需要。

电力有源滤波器是自关断电力半导体器件采用脉冲宽度调制工作方式的谐波电流发生器,可以产生相位、频率、幅值可调的谐波电流。将这些谐波电流注入系统,以抵消原有的谐波,主要用于对谐波限制较严格的系统中。

2.4.3 换相缺口

由于网侧存在电抗,变流装置在换相期间,参与换相的电压会发生突降,使电网出现电压缺口,称为换相缺口。换相缺口可能激发高频振荡,干扰通信和电子设备的工作。对变流装置本身,若缺口宽度比触发脉冲的宽度还要宽,则会造成触发失败而导致变流装置工作不稳定。换相缺口在低压配电系统中尤为明显,为了减小换相缺口的影响,常采取变流变压器或电抗器,以便在变流装置与系统母线之间引入隔离阻抗,从而减小公共耦合点的缺口深度,隔离变压器应尽可能靠近变流装置。

2.4.4 对通信系统的干扰

变流装置供电系统的电力输电线和邻近平行的通信线路之间会发生静电感应和电磁感应,从而在通信系统内产生音频干扰。变流器主要谐波分量都在音频范围之内(一般在300Hz以上),对电话、电报和无线通信系统的干扰影响是一个重要问题。

2.4.5 电磁兼容性估计

电网的扰动超过一定的极限时,会导致变流装置性能下降,甚至中断运行或损坏。为保证变流装置正常运行,在设计时除考虑变流器对电网的干扰不超过有关规定外,还要求变流器具备一定抗干扰能力。如果变流装置的抗扰等级高于电网中的扰动等级(包括变流装置本身接入后引起的扰动),并且变流装置对电网产生的扰动也低于电网允许的扰动极限,则称该变流装置与所在的电网兼容。变流装置电磁兼容性估计的基本内容和步骤如下。

(1) 按照变流装置需要接入母线的类型,初步选择抗扰等级。

(2) 了解网络主要节点在稳态及暂态下交流电压幅值、不对称度和电压波动等情况,并根据电网在最小运行方式时的短路容量、变流装置的工作制等参数,计算变流装置的功率因数及各级配电母线电压波动和闪变电压。若频率波动、电压波动及不对称度等不能满足要求,则应采取抑制措施加以改善或者重新选择变流装置的抗扰等级。这一步估计,可不考虑变流装置的非线性特性,只考虑其基波分量。

(3) 考虑变流装置的非线性特征。计算注入电网的谐波电流及电网中各点的谐波电压、换相缺口等参数,分析是否满足标准和变流器装置本身的要求。若不满足要求,则必须采取抑制措施。

(4) 上述过程中,无论哪一步采取了抑制措施或改变了变流器装置参数,都需要重新进行电磁兼容性估计。

2.4.6 电磁场兼容性设计

控制电磁干扰源的能量发射,切断电磁干扰的耦合通道,提高被干扰设备或系统的抗干扰能力是电磁兼容设计的主要内容。设计过程中应注意以下几点。

(1) 电子设备或系统中应当选用本身电磁辐射能量低、抗干扰能力强的单元电路形式。小信号放大器应增大线性动态范围,提高电路过载能力,以减小非线性失真;功率放大器应工作在甲类状态,以减小产生的谐波;工作在乙类状态时,应采用推挽形式来抑制二次谐波;丙类状态用于射频放大时,应采用锐调谐、高Q滤波器来抑制谐波干扰。

(2) 元器件和电路排布时应将易受干扰的敏感元器件和单元电路尽可能远离干扰源,输出与输入端妥善隔离,高电平电缆、脉冲引线与低电平电缆分开排布。

(3) 用屏蔽体包封干扰源,可以防止电磁辐射干扰向外传播;用屏蔽体包封被干扰电路,可以防止电磁干扰能量作用到被干扰电路。电磁屏蔽体会使散热困难、维修不便、成本增加,应根据费效比进行设计。

(4) 设计和选用低阻抗地线,正确设计单元电路或设备的接地系统、电缆屏蔽层的接地方式、信号电路屏蔽体的接地方式等,并采用阻隔地环路干扰的合理措施。

(5) 滤波器的主要功能是对有用信号以外的能量进行抑制,对干扰源和被干扰电路采用滤波技术,能够显著降低传导干扰电平。

3 电磁干扰滤波器

电磁干扰滤波器是抑制电磁干扰的一种重要方法。由于干扰源发出的电磁干扰频谱比有用信号的频谱宽得多,因此当接收有用信号时就不可避免地接收不希望的干扰信号。采用滤波器能限制接收信号的频带以抑制无用的干扰,而不影响有用的信号。电气设备上所有电源线和信号线都存在引入电磁干扰的可能性,因此,从电磁兼容的角度考虑,电源线与信号线上必须安装滤波器。

3.1 电磁干扰滤波器的主要特性

电磁干扰滤波器的有两种作用方式,一种是不让无用信号通过,并把它们反射回信号源;另一种是把无用信号在滤波器里消耗掉。电磁干扰滤波器的主要特性参数有额定电压、额定电流、频率特性、输入输出阻抗、插入损耗、传输频率特性、功率损耗、相位延迟、可靠性、工作温度等。

(1) 描述滤波器性能的最主要电气性能参数是插入损耗

$$IL = 20\log(V_1/V_2) \tag{9.4-8}$$

式中:IL表示插入损耗,dB;V₁和V₂为接入滤波器前后

信号源在接收端负载上建立的电压。

(2) 滤波器的传输频率特性,可用对数幅频特性表示,也称衰减系数

$$\alpha = 20\log[|V_o(f)/V_i(f)|] \tag{9.4-9}$$

式中:α为衰减系数,dB;V_o为滤波器的输出信号;V_i为滤波器的输入信号;f为信号的频率。

(3) 滤波器的工作条件不当,如超过额定电压、电流及允许的温度范围时,会导致工作不稳定,甚至失效和损坏。如滤波器与端阻抗之间失配会产生“振铃”现象,对某些频率会产生谐振。若滤波器本身缺乏良好屏蔽或接地不当等,更将引进新的干扰。除此之外,滤波器对有用信号也会带来一定畸变。

3.2 电磁干扰滤波器的分类

(1) 根据滤波器的作用对象可分为电源线滤波器和信号线滤波器。安装在电源线上的滤波器称为电源线滤波器。电源线滤波器除了要保证满足安全方面的要求外,还要注意当负载电流较大时,电路中的电感不能发生饱和而导致滤波器性能下降。

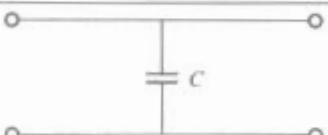
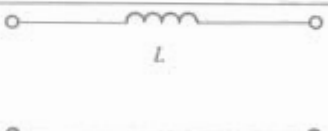
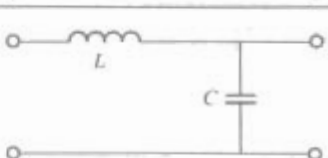
安装在信号线上的滤波器称为信号线滤波器,信号线滤波器不能对工作信号有严重的影响,不能造成信号的失真。

(2) 按照对不需要信号能量的抑制方式可分为反射式滤波器和吸收式滤波器。反射式滤波器是指由电感器和电容器组成,能阻止无用信号通过,把它们反射回信号源的滤波器。根据要滤除干扰信号的频率与工作频率的相对关系,反射式滤波器有带阻滤波器、带通滤波器、高通滤波器和低通滤波器等。

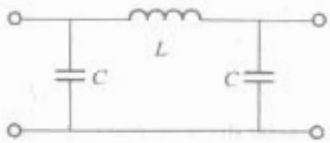
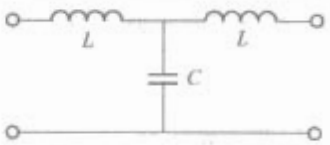
吸收式滤波器是将不希望的信号吸收掉,以达到滤波目的,包括有损耗滤波器、有源滤波器和电缆滤波器。为了消除LC型低通滤波器的频率谐振和要求终端负载阻抗匹配的弊端,使电磁干扰滤波器能在较宽的频率范围里具有大的衰减,采用介电损耗较大的磁性材料(如铁氧体加导电涂层)制作的损耗滤波器可以把高频电磁能量转换成热能。

(3) 按照所使用的元件可分为无源滤波器和有源滤波器。无源滤波器有电感和电容等无源元件组成,其基本形式、插入损耗和转折频率见表9.4-10,抑制低频干扰的滤波器一般体积庞大而笨重。使用半导体器件的有源滤波器,不需要过大的体积和质量就能提供较大的等效电感和电容,更适于低频、低阻抗电源电路的滤波。有源滤波器包括有源电感滤波器、有源电容滤波器以及对消滤波器。

表 9.4-10 无源滤波器的基本形式、插入损耗和转折频率

滤波器类型	结构形式	电源和负载阻抗均为R时的插入损耗
电容滤波器		$IL = 10\log\left[1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right], f_0 = \frac{1}{\pi RC}$
电感滤波器		$IL = 10\log\left[1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right], f_0 = \frac{R}{\pi L}$
L形滤波器		$IL = 10\log\left[1 + \frac{(1-d)^2}{2d} \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^4\right]$ $f_0 = \frac{\sqrt{2}}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ 阻尼比 } d = \frac{L}{R^2C}$

续表

滤波器类型	结构形式	电源和负载阻抗均为 R 时的插入损耗
π 形滤波器		$IL = 10\log\left[1 + \frac{(1-d)^2}{d^{2/3}}\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - \frac{2(1-d)}{d^{1/3}}\left(\frac{f}{f_0}\right)^4 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^6\right]$ $f_0 = \frac{1}{\pi(4RLC^2)^{1/3}}, \text{ 阻尼比 } d = \frac{L}{2R^2C}$
T 形滤波器		$IL = 10\log\left[1 + \frac{(1-d)^2}{d^{2/3}}\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - \frac{2(1-d)}{d^{1/3}}\left(\frac{f}{f_0}\right)^4 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^6\right]$ $f_0 = \frac{1}{\pi}\left(\frac{R}{4L^2C}\right)^{1/3}, \text{ 阻尼比 } d = \frac{R^2C}{2L}$

电容滤波器是最简单的低通滤波器，适用于阻抗较高的系统，对高频干扰提供 20dB/dec 的衰减；使用穿心电容器，工作频率可达 1GHz 以上。电感滤波器也是简单的低通滤波器，适用于阻抗较低的系统，对高频干扰提供 20dB/dec 的衰减；使用共模电感扼流圈可以有效抑制共模干扰。L 形滤波器的电容应并联在较高阻抗端，对高频干扰提供 40dB/dec 的衰减；但在转折谐振频率附近，滤波器呈现负插入损耗。 π 形滤波器容易制造，是实际中最常用的形式，对高频干扰提供 60dB/dec 的衰减；抑制瞬态干扰不是很有效，适用于在低频需要较高衰减的场合，用金属外壳屏蔽可以改善高频性能。T 形滤波器对高频干扰也提供 60dB/dec 的衰减，缺点是需要两个串联电感，滤波器体积较大。对 π 形和 T 形滤波器，阻尼比 $d=1$ 时为接近理想巴特沃斯响应的最佳阻尼（衰减）；当 $d>1$ 时为过阻尼，并有波动电压的响应模式；当 $d<1$ 时为欠阻尼，转折频率处陡度欠佳。

3.3 电源线滤波器

电源线滤波器又叫电网滤波器、电源噪声滤波器、电源滤波器。从频率选择的角度看，电源滤波器是一种低通滤波器，它能几乎无衰减地把直流电源和 50Hz、400Hz 等低频电源的功率输送到用电设备，同时又能使高频干扰信号大大衰减，以保护设备免受损害。另一方面，它也能抑制设备本身产生的干扰信号，防止污染电网的电磁环境，危害其他设备。

3.3.1 电源滤波网络

传导干扰有共模（CM）和差模（DM）两种干扰分量，针对不同性质的干扰可分别采用图 9.4-8 的共模滤波网络和图 9.4-9 的差模滤波网络。实际上，一般电源线中同时存在共模和差模干扰，因此实用的电源滤波网络均由共模滤波网络和差模滤波网络综合而成，如图 9.4-10 所示。

在共模和差模综合滤波网络中，两个电感 L_1 和 L_2 是绕在同一磁环上的两个独立线圈，它们的圈数相等，绕向相反，主要起共模电感作用，而差模电感由两个线圈的漏电感

构成。共模滤波电容 C_y 会在地线产生漏泄电流，存在潜在的电击危害，共模电容应小于 0.1 μ F。为了避免电容放电产生的电击危害，差模电容大于 0.5 μ F 时应增加一个泄放电阻，保证滤波器断电 1s 后，电容的残余电压小于 34V。

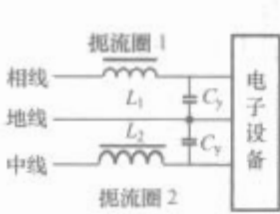


图 9.4-8 共模滤波网络

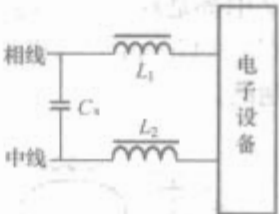


图 9.4-9 差模滤波网络

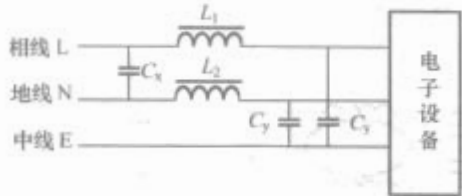


图 9.4-10 实用电源滤波网络

由于电源滤波器是一个无源 4 端口网络，所以它在连接时具有互易性，即连到电源端的输入端口和连到负载端的输出端口原则上是可以互换的，特别是在电源内阻和负载内阻相等时，这两种接法获得的插入损耗是相同的。不过，在实际应用中，必须根据滤波器两端将要连接的电源阻抗和负载阻抗的实际值，来合理选择其网络结构及参数，才能取得满意的干扰抑制效果。

为了尽可能地衰减需抑制的电磁干扰信号，在干扰信号频率范围内，应实现滤波器与电源或负载阻抗最大程度的失配。这点与一般信号选择滤波器正好相反，对信号选择滤波器而言，恰恰要求应用频率范围内，与前后阻抗有着尽可能完善的匹配，以使被传输信号的损耗尽量小。图 9.4-11 给出了电源滤波器与阻抗的搭配组合原则，可作为选择和设计滤波器的依据。如果滤波器在两个方向连接到相对较低的阻抗，则滤波器电路应含有串联电感（如 T 形滤波器）；如

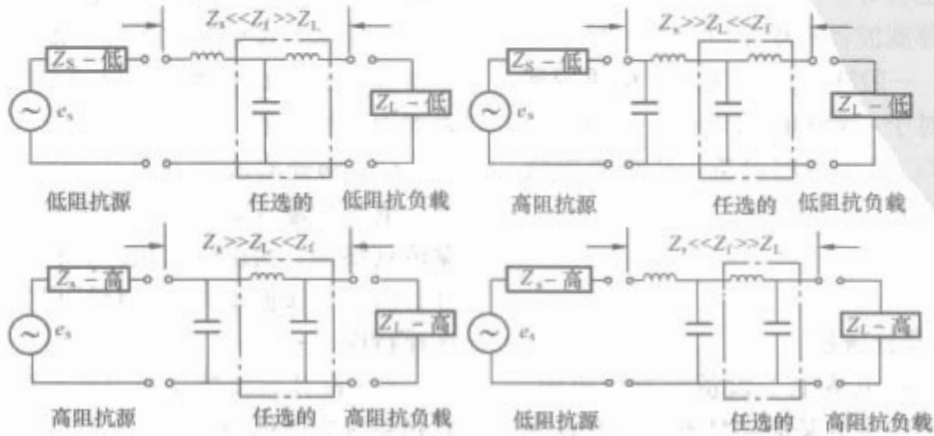


图 9.4-11 电源滤波器与阻抗搭配组合原则

果在两个方向连接到相对较高的阻抗，需采用 π 形滤波器；如果滤波器接在两个失配阻抗之间，可采用非对称滤波电路（如 L 形滤波器），串联元件应面向电路的低阻抗一边，并联元件面向高阻抗一边。

3.3.2 开关电源滤波器

开关电源与线性稳压电源相比，具有体积小、效率高的优点。但是，开关电源本身产生的电磁干扰也是十分严重的，既有较大的幅度，又有很宽的频率范围（可以从 10kHz ~ 几百 MHz），对被供电设备是很大的威胁，必须采用专门设计的开关电源滤波器才能有效抑制。开关电源滤波器的典型结构如图 9.4-12 所示，比一般电源滤波器增加了两个独立的差模抑制电感 L_3 和 L_4 ，使 30~400kHz 的传导干扰得到明显衰减。图 9.4-12 (a) 为双 L 形差模滤波网络，输入输出端口的阻抗都较高；而图 9.4-12 (b) 为 π 形差模滤波网络，输入端阻抗高于输出端阻抗。对共模干扰信号，图 9.4-12 中都是利用装于电源入口处的两个电容器 C_Y （通常可取 $C_Y=4700\text{pF}$ ）与电感一起构成 L 形共模滤波网络来加以抑制的。

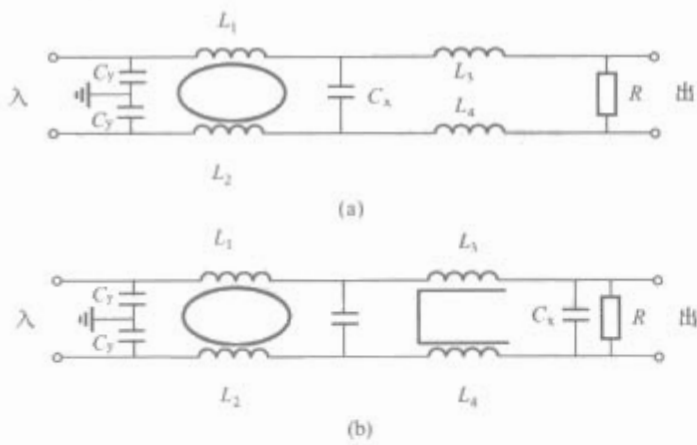


图 9.4-12 开关电源滤波器的典型结构
(a) 双 L 形差模滤波网络；(b) π 形差模滤波网络

3.4 信号线滤波器

信号线滤波器又称为信号选择滤波器，是一种用在各种信号线（包括直流）上的低通滤波器，它的作用是滤除信号线上各种不必要的高频干扰成分。

信号线滤波器可分为线路板安装滤波器、馈通滤波器和连接器滤波器等三种类型。线路板安装滤波器，适合于安装在线路板上，具有成本低、安装简便等优点，但高频滤波效果不很理想。馈通滤波器具有良好的高频滤波效果，特别适合于单根导线穿过屏蔽体的场合，以及需要对设备内部不同类型电路（如数字电路和模拟电路，强信号电路和弱信号电路）之间的互连线进行隔离滤波的场合。连接器滤波器适合于安装在屏蔽机箱上，主要用于多根导线（电缆）穿过屏蔽体时滤波，其高频滤波效果也较好。

从电路形式看，信号选择滤波器有单个电容型、单个电感型、L 形、 π 形和 T 形等。一般滤波组件越多，从通带到阻带的过度带越窄、越陡。对于一般的民用设备，使用单个电容/电感型就可以满足要求；对于军用设备，往往需要使用相对复杂的 L 形、 π 形和 T 形。

3.5 专用滤波器

3.5.1 发射机和接收机的信号滤波器

在通信、导航、雷达、无线电等电子设备的发射机中，发射电路产生的信号除了调谐频率的基波信号外，还有各种乱真信号和谐波信号（如交调信号、互调和非线性失真等），

基本原因是发射机内的放大器工作在非线性区引起的失真。为了提高器件的效率，往往不得不工作在非线性区，有的甚至是利用非线性而实现的功能，因此在发射机中产生乱真信号几乎是不可避免的，为此必须在发射机中应用滤波器来抑制电磁干扰信号。在发射机中滤波器应用很广，表 9.4-11 列举了部分发射机滤波器的功能和性能概况。

表 9.4-11 部分发射机滤波器的功能和性能概况

类型	功 能	应用频率范围(Hz)	通带插入损耗(dB)	功率容限(W)	调谐方式
LC 谐振回路	带通或带阻	可达 100M	1	500k	机械调谐
SRI 高频滤波器	带通	可达 100M	0.3	20k	机械调谐
SRI 甚高频滤波器	带通	可达 500M	0.3	5k~10k	机械调谐
耦合谐振器	带通	大于 10G	0.1	波导的 20%	机械调谐
三腔谐振器	带通	大于 1G	0.3	1~9M	机械调谐
带状线	带通	200M~1G	0.1	50M	固定
圆形波导	低通	大于 1G	0.5	10k~20k	固定
普通定向耦合器	低通	大于 1G	0.3	波导的 20%	固定
铁氧体滤波器	带通	大于 1G	0.1	较低	固定或电调
周期滤波器	带通	大于 1G	1.4	峰值 50k	固定

在发射机功率放大器中常用的滤波方式有三种。第一种方式为集中滤波，在放大器输出端设置一个高质量的滤波器。由于滤波器本身或多或少总存在一些损耗，这就使发射机功率受到损失，而且滤波器的损耗越小，其复杂程度和成本越高，因此在发射功率较大的发射机中，实现集中滤波是比较困难的。第二种方式是分散滤波，在各级功率放大器之间进行滤波。滤波器分散在各级放大器级之间，既可抑制不需要的信号，又可实现级间的阻抗匹配，使信号得到最大增益。这种方式对滤波器的性能要求相对较低，权衡技术复杂性和经济性比较合算，因此在工程中得到广泛应用。第三种方式为混合式滤波，既在各级放大器级之间采用分散滤波，又在末级放大器采用集中滤波。

3.5.2 中频放大器的滤波器

近年来，在中频放大器的滤波器回路中广泛采用固体电子器件构成的滤波器，常用的有陶瓷滤波器、晶体滤波器和表面声波滤波器。

(1) 陶瓷滤波器是利用陶瓷压电材料的压电原理制成的。电信号输入后，由于压电逆效应而产生机械振荡，由始端传到终端，再由压电效应将机械能转换成电能，变为电信号。由于机械振动的频率特性很尖锐，Q 值很高，有很好的选择特性。

(2) 晶体滤波器是利用石英振荡器代替一般的 LC 谐振电路制成的固体滤波器，可以获得十分尖锐的滤波特性。把石英晶体切成片状，当晶片两边施加不同极性的电压时，晶

片的几何尺寸将压缩或伸张。当高频交流电压加于晶片时,它将随交变信号的变化而产生机械振动。当外加信号频率与晶片固有振动频率相等时,机械振动最强,产生谐振现象。

(3) 表面声波滤波器是利用声表面波器件的频响特性制成的,体积小、成本低、工作可靠,在彩色电视机中的接收电路几乎全都采用这种滤波器件。通常声表面波器件采用具有压电效应的固体材料作为基片,在基片上设计指叉交错的金属换能器。把电信号加到换能器上就能激发出声表面波,在另一端就能得到电信号,指叉换能器具有一个固有的中心频率,当电信号与中心频率一致时就会产生共振,发出最强的声表面波,而那些偏离中心频率的信号分量,因其激发的声表面波很弱而被抑制。

3.6 电磁干扰滤波器的正确选择和使用

电磁干扰滤波器的设计或选择,主要依据是干扰特性和系统要求。因此,在设计或选择滤波器时,应该知道干扰的频率范围及大致量级,明确要求的抑制效果,了解滤波器的使用环境,还需对滤波器在设备上的安装位置和允许占用的空间有所考虑。

3.6.1 电磁干扰滤波器的设计和选择原则

(1) 电磁干扰滤波器在相应工作频率内,应能满足负载要求的衰减特性。若一种滤波器衰减量不能满足要求,则可采用多级滤波器串联。相同滤波器的级联,可以获得更高的衰减;不同的滤波器级联,可以获得在宽频带内良好的衰减特性。

(2) 滤波器应满足负载电路工作频率和需抑制频率的要求。如果要抑制的频率与有用信号的频率非常接近,则需用频率特性非常陡峭的滤波器,才能把需抑制的干扰频率滤掉,而只允许有用频率信号通过。

(3) 在所要求的频率上,滤波器的阻抗必须与它连接的干扰源或负载阻抗失配。如果负载是高阻抗,则滤波器的输出阻抗应低,反之相反;如果电源或干扰源是低阻抗,则滤波器的输入阻抗应高,反之相反。如果源阻抗或负载阻抗未知,或在很大范围内变化,则很难得到稳定的滤波特性;为了获得良好的滤波特性,可在滤波器的输入端和输出端同时并接一个固定电阻。

(4) 滤波器允许通过的额定电流应与电路中连续运行的额定电流一致,并且必须具有一定的耐高电压能力,以保证在所有预期工作的条件下都能可靠地工作,并能经受输入瞬时高电压的冲击。

(5) 滤波器应与特定的用途相适应。例如,屏蔽室用的电源滤波器,应使其抑制频带与屏蔽室的防护频带相同,使插入损耗与屏蔽室的屏蔽效能有相同的数量级;用于抑制工业干扰或消除电子设备向电网发射干扰的滤波器,则应在工业干扰的频谱范围内保持一定的插入损耗值。目前已经有为各种用途设计的不同类型商品滤波器出售,可以从应用需求出发正确选用。

(6) 滤波器应有足够的机械强度,在满足要求的前提下,尽量结构简单、体积小、质量轻、安装方便,还要安全可靠。对于滤波器中应用较多的铁氧体 EMI 抑制组件,在使用空间允许的前提下,一般以选择尽量长、尽量厚和内孔尽量小的铁氧体为原则,以提高 EMI 抑制效果。

3.6.2 电磁干扰滤波器的正确安装

除了选择或设计合适的滤波器外,使用时还要注意正确安装,才能获得预期的滤波特性。安装电磁干扰滤波器时,通常应注意下列几点。

(1) 滤波器最好安装在干扰源出口处,并将干扰源和滤波器屏蔽在一个盒子里。若干扰源内腔空间有限,则应安装在靠近干扰源出线处外侧,滤波器壳体与干扰源壳体进行良好搭接。对于电源线滤波器,则应安装在离设备电源入口尽量靠近的地方,不要让未通过滤波器的电源线在设备箱体内存回。

(2) 滤波器的电容器引线应尽可能短,以免引线的等效感抗和容抗在某个较低频率上形成谐振。穿心电容器和三端电容器是为减少引线电感而设计的电容器,前者无需专门引线,后者引线很短,它们的自谐振频率可以高达 1GHz,是常用的干扰抑制组件。

(3) 滤波器的输入、输出线必须分开,以防止输入端和输出端之间的电磁耦合降低滤波器的衰减特性。滤波器应加屏蔽,并使屏蔽壳与设备机壳良好接合。通常应用隔板或底盘固定滤波器,屏蔽引线必须可靠。

(4) 套管滤波器必须完全同轴安装,使电磁干扰电流呈辐射状流经电容器。若能把套管电容器通过法兰盘直接安装到干扰源上与设备组成一体,接地电流就会呈辐射状流过,抑制频率范围将可以扩展到几千 MHz。如果安装不当,抑制效果将会大打折扣。

4 电线和电缆的布局

在系统中线间耦合是仅次于天线耦合的一种重要耦合路径,而在设备中则是居首位的干扰原因,线缆敷设的布局应满足电磁兼容性要求。

4.1 线间电磁耦合现象

线间电磁耦合主要发生在同一线束的电线或电缆之间,通常采用电路理论分析,对低频可采用集中参数模型,在高频需采用传输线模型。

4.1.1 低频耦合

当线缆的耦合长度等于或小于 $1/16$ 波长时,可采用集中参数的低频耦合模型。

4.1.1.1 磁场耦合

当电缆连接的电路工作于低阻抗时,低频磁场耦合引起的干扰是十分明显的。线间低频磁场耦合的物理模型是电感耦合,线路互感构成了两电路之间的互阻抗耦合,可采用下述方法降低线缆的磁场耦合。

(1) 当一个电路影响多个电路时,最好的方法是在干扰电路中安装干扰抑制滤波器。

(2) 为减小电路环路面积,使信号线尽量靠近其回线,最好用双线制代替单线制,把信号线与其回线扭绞在一起。利用结构件作回线,会使感应回路或激励回路面积增大。

(3) 减小干扰源与感应回路间电感耦合最有效的方法是尽量增大两电路间距,使源回路和感应回路平面互相正交或接近正交,也可降低两电路之间的耦合。

(4) 用带状高导磁率材料包扎敏感线,可有效地解决磁场干扰问题,尤其是长距离输电线的磁场泄漏问题。要充分发挥高导磁率屏蔽材料的屏蔽效能,必须注意构成闭合磁路。一般高导电率的屏蔽层不能有效地抑制低频磁场耦合。

4.1.1.2 电场耦合

线间低频电场耦合的物理模型是电容耦合,线路的互电容构成了两电路之间的互阻抗耦合,降低电容耦合可采用下述方法。

(1) 增大电路间距是减小电容耦合最好的方法。电路设计时设法降低敏感电路的输入阻抗,可有效降低低频电场

感应。

(2) 接地的高导电率材料屏蔽层能有效地衰减电场。对低频干扰,为防止形成屏蔽层感应环流,屏蔽层须单点接地。

(3) 抵消敏感线内干扰电压和电流的另一方法是采用平衡线路,使信号电流在信号线和其回线间流动。干扰电压耦合到这两根线上时,由于振幅相等、相位相反而互相抵消。

4.1.2 高频耦合

高频电缆是指长度大于1/4波长的走线,由于电路中出现电压和电流驻波,会使耦合增强。当频率很高时,即使很短的走线也会产生明显的辐射和感应。对于高频耦合,在电线、电缆敷设时常采用下列措施。

(1) 电缆屏蔽层、旁路电容和各种电路的接地线要尽可能短而粗,设备外壳接地最好不要用搭接条而应采取良导电的面接触方法。

(2) 滤波器的输入线和输出线要隔离,防止因高频耦合而降低滤波效果。

(3) 长连接电缆要用屏蔽线或同轴线,射频电缆可采用双重屏蔽。电缆尽量紧靠接地板敷设,电缆屏蔽层要多点接地,多根电缆屏蔽层间要相互隔离。

(4) 连接器必须保持电磁密封性,连接器的每个连接触点最好有屏蔽。要注意接连接器的空插针及开关中开路接点连线在高频的天线效应,最好将连接器的空插针接到地电位。

4.2 一般设计原则

工程设计中,主要依靠制订电线电缆安装分类设计规范来避免系统内电线电缆之间的电磁干扰。但在设备和电线电缆密集的区域,分类技术难于实现,此时需要仔细分析线间干扰耦合,并找出合理的敷设方法。

4.2.1 线缆的分类

系统布线设计要保证敏感电路和干扰电路之间充分隔离,传统的做法是把电线电缆编排分成可兼容的组。根据端口性质,可将电线电缆分成5类(见表9.4-12);根据电线电缆终端负载的发射功率和敏感度水平,可将电线电缆分成6类,每类所覆盖的功率电平范围为30dB左右(见表9.4-13);也可按电路电压、电流和频率将互连线分类(见表9.4-14),这种分类体系包括9种线路和7个类型。

各类电缆一般应分别捆扎、分开敷设,但在采取适当措施(如屏蔽、扭绞)后相邻类也可合并在一起。布线设计时,拉开各类线束的间距是解决线间电磁耦合最有效、最经济的方法,一般各类互连线之间至少应保持75mm间距。

表 9.4-12 线缆的端口分类法

类别	线 路 特 性
1	主电源线路:包括主电源配电线路
2	二次电源线路:包括低压与照明线路、伺服与同步线路和5000V以下的辅助直流电源
3	控制线路:包括继电器、开关及其他断续工作器件的线路
4	敏感线路:包括音频、数字数据、模拟控制和解调器输出信号等电路
5	隔离线路:极敏感或电平极高的电路,包括无线电和雷达的发射机或接收机天线电路,以及电引爆装置、火警报告、油量表线路和主发电机馈线等

表 9.4-13 线缆的功率电平和敏感度分类法

类别	功 率 范 围	终 端 设 备
A	>+40dBm	大功率直流/交流和射频源
B	+10~+40dBm	小功率直流/交流和射频源
C	-20~+10dBm	脉冲和数字电路、视频输出电路
D	-50~-20dBm	音频和传感器敏感电路,视频输入电路
E	-80~-50dBm	射频和中频输出电路,安全保护电路
F	<-80dBm	天线和射频电路

表 9.4-14 线缆的电压、电流和频率分类法

7 个类型	9 种 线 路
I	(1) 电源和控制电路。包括大于2A的直流电源电路和小于2A的直流控制电路
II	(2) 直流基准电路。具有高精度电压或电流的直流电路(也可认为是音频敏感电路) (3) 音频敏感电路。电压或电流一般低于1V或200mA,音频干扰可能影响电路的性能
III和IV	(4) 交流电路。由交流电源供电的任何电路 (5) 交流基准电路。使用单相线来提供高精度电压和频率的交流电路 (6) 音频干扰电路。工作频率在15kHz以下,通常电压大于1V,电流大于200mA
V	(7) 射频敏感电路。这种电路的性能在有射频干扰信号时可能会下降
VI	(8) 射频干扰电路。包括窄带功率射频干扰电路和用脉冲方式传递信息或存在瞬变干扰的宽带电路
VII	(9) 天线电路。把分系统或设备与天线连接起来的电路

4.2.2 电缆的选用

4.2.2.1 一般选用规则

选用电缆时除了需要考虑电路特性和环境条件,还必须考虑电磁兼容性要求。从电磁兼容性角度,选用电缆需要考虑的因素是传输信号波形、频率范围、功率电平、电路敏感度以及电磁环境。在设备密集的舱室内布置线缆,分类和最小间距要求往往难以兼顾,此时需要选用特殊电缆,例如屏蔽或扭绞电缆来弥补。

(1) 对于外部电源线路,如220/380V交流或28V直流供电,一般可用未屏蔽的电线,但当电源本身产生电磁干扰较大时,电线应适当屏蔽起来以防止干扰辐射,并且电源线对自身应该扭绞。对于高增益放大器的供电电源,若放大器没有安装能提供足够衰减的滤波器时,为防止受其他电路影响,最好用屏蔽扭绞线。

(2) 天线电路一般选用同轴电缆或波导作信号传输线。在100kHz以下,可用屏蔽扭绞电缆或多层屏蔽电缆作天线电路信号传输线。

(3) 控制电路、中电平电路和数字电路宜用扭绞线或屏蔽扭绞电缆作信号传输线。

(4) 低电平的直流或低频信号电路,对低频电磁场及其敏感,由于“音频整流”现象对高频EMI也很敏感,所以采用屏蔽扭绞电缆较好。为保证屏蔽层单点接地,电缆屏蔽层外面一定要有绝缘护套。

4.2.2.2 导管

未屏蔽的电线,可装在连续的柔性或刚性金属导管中予以屏蔽。为防止管内电线间相互影响,最好成对使用,并让它们在大体相近的电压和电流上工作。

刚性导管常用铝和钢材料，铝管对静电感应和高频电磁屏蔽比较有效，但不能屏蔽低频磁场，所以常用钢管屏蔽高电平电源线路或音频线路。用作高压电场屏蔽的柔性导管通常是由一层或数层金属编织物构成，增加编织密度、减小编织物金属线之间的接触电阻，可提高屏蔽效能。

4.2.3 电缆和连接器

4.2.3.1 连接器

电源、控制、音频、视频、脉冲和射频等各种端口需要不同形式和性能的连接。为保证连接器能满意地屏蔽贯通它的线路，其外壳表面必须能导电，并保证连接器与电缆结合处屏蔽不能中断。连接器连接插针之间的接触电阻必须很小，一般要用高导电率、防锈、防污、抗腐蚀和耐磨的材料镀覆。

4.2.3.2 连接器插针分配

连接器插针应根据所连接的电路类别和屏蔽层端接的要求进行合理分配。

(1) 当一个连接器同时连接不同类别的线路时，必须防止因插针分配不当造成电路之间的相互影响，充分利用接地插针隔离不同类别的电路。射频干扰电路不允许与其他电路共用一个连接器，同轴电缆应单独使用同轴连接器。不同主电源供电的电路，不能共用一个连接器。

(2) 要选用有足够多插针的连接器，以满足屏蔽层端接对插针的要求。不同类别屏蔽电缆的屏蔽层应接到不同的插针上，屏蔽层剥去部分的长度一般不应超过 75mm。

4.2.3.3 连接器的屏蔽性能

连接器插入屏蔽电缆电路时，不应降低屏蔽电缆的屏蔽完整性，因此必须正确处理屏蔽层和连接器的端接和接地。

(1) 对射频干扰电路和敏感电路，必须保证屏蔽的连续性，并且两端均应接地。

(2) 天线馈线，一般采用同轴电缆或波导管，同轴电缆的屏蔽层应在连接器两侧和连接器外壳 360°连接，绝不可把屏蔽层扭绞起来接到连接器外壳，更不能把屏蔽层的任何部位剪断。

(3) 高频电缆与连接器连接时，屏蔽层不可通入封闭的机箱内后再接地，否则屏蔽层外表面的干扰电流会在机箱内形成环路并在箱内产生干扰电磁场。

(4) 同轴接头必须紧密配合，插脚接触松弛可能会引起干扰能量的整流效应。

4.2.4 屏蔽层接地

根据接地原理，在 100kHz 以下频率工作的敏感电路，其电缆的屏蔽层应该只在一端接地，屏蔽层外应有绝缘护套以保证单点接地。对于高频信号，如果电缆长度大于波长的 1/10，则屏蔽层应每隔一定距离与地连接，以避免在屏蔽层感应大的电流与电压。在电缆贯穿金属板或设备内壁处，电缆屏蔽层必须与壁板相连接。数据传输线等脉冲电缆的屏蔽层应多点接地，至少要在电缆两端接地。

4.2.5 安装控制

在设备和布线稠密的区域，线缆施工中应当注意下列几点。

(1) 不同类别线束在穿过壁板的减轻孔之前应保持最小间距，穿过减轻孔后应尽快分开。电源线与信号线不能捆扎在一起，应分别穿过不同的减轻孔。接到设备连接器的线缆应尽快按类别分开，不同类别线路一起走线的长度应不超过 0.9m。

(2) 通过同一导管的线缆应有相近的工作电压和电流，电源线与信号线不能放在同一导管内。不同类别线束的卡箍

不应使用同一个螺钉固定，尤其是电源线与信号线、高电平干扰信号线与低电平敏感线的卡箍要分开固定。

(3) 接地桩是为电路提供公共基准点的端子，电源电路和信号电路、干扰电路和敏感电路应分别接不同的接地桩。当系统使用两个主电源时，为安全起见，不同电源供电的设备不应共用一个接地桩或有多个接地桩组成的一个接地汇流条。

(4) 电缆应采用适当的代码来标识线缆类别和线束走向等信息。

4.3 船舶布线设计

4.3.1 五类电缆

船舶上电缆按电磁发射和敏感性要求分为 5 类（见表 9.4-15），多芯电缆以其中电磁发射和敏感性最严重的一根芯线归于 5 类电缆。

表 9.4-15 船舶用电缆的分类

类型	说 明
一类电缆	电磁发射电缆（E），包括：电源电缆、馈电电缆、非线性负载电缆和大功率开关电路的电缆。
二类电缆	电磁敏感电缆（S），包括：含低电平模拟信号电缆、低频信号电缆、视频信号线、音频信号线、数据传输低频控制线、电话线、同步指示信号线、油表指示线等电缆。
三类电缆	既有电磁发射又敏感的电缆（ES），主要是脉冲数字信号电缆。
四类电缆	中性电缆（N）：此类电缆既不发射又不敏感，主要包括低电平的阻抗负载线、照明线等电缆。
五类电缆	专用电缆（X），包括通信发射机的馈线、电引爆装置电缆和接收机电缆。

4.3.2 电缆间距的一般要求

船舶各类电缆敷设的最小间距见表 9.4-16。

表 9.4-16 船舶各类电缆敷设的最小间距 mm

电缆类型	一类（E）	二类（S）	三类（ES）	四类（N）	五类（X）
一类电缆（E）	0	150	100	0	200
二类电缆（S）	150	0	100	0	150
三类电缆（ES）	100	100	0	100	150
四类电缆（N）	0	0	100	0	100
五类电缆（X）	200	150	150	100	0

4.3.3 特殊电缆敷设间距要求

(1) 大功率发射天线馈线在露天部分应尽可能短，并应单独敷设，与其他所有电缆的距离至少应为 200mm。如果天线馈线在露天的长度超过 5m，则安装时应加大天线馈线与其他电缆的距离。

(2) 低频低电平的声纳接收换能器电缆距其他电缆至少应 150mm。声纳发射换能器电缆一般应单独敷设，与低频

敏感电缆的距离至少为 450mm，距其他电缆至少为 300mm。

(3) 低电平数字信号电缆是极敏感电缆，敷设中应距其他类电缆至少有 150mm。高电平脉冲宽带数字电缆与其他电缆的距离至少为 300mm。

(4) 含电爆装置武备系统的电点火线路电缆应单独敷设，与其他电缆的距离最少为 150mm。如特殊电缆在敷设中达不到要求时，应选可能的最大间距并加强屏蔽。

4.3.4 电缆选用

可按电磁发射和敏感特性以及使用环境来选用电缆，表 9.4-17 的船舶电缆选用推荐表可作为一种参考。

表 9.4-17 船舶电缆选用推荐表

电缆用途	电缆类型	推荐采用电缆
主交流电源到设备(三相)	E	三芯或四芯扭绞不屏蔽电缆
主交流电源到设备(单相)	E	双股扭绞不屏蔽电缆
主直流电源到设备	E	双股扭绞不屏蔽电缆
二次交流电源到设备(三相)	E	三芯或四芯扭绞不屏蔽电缆
配电布线	E	双股扭绞或单股裸露线电缆
从设备到电源引线	E	扭绞电缆或屏蔽电缆
大于 5A 的加热或阻性负载	N	扭绞不屏蔽电缆
小于 5A 的照明负载	N	单根不屏蔽电缆
大于 5A 的感性负载	E	屏蔽电缆
小于 5A 的感性负载	E	单根电线或屏蔽电缆
数字电路	ES	扭绞屏蔽电缆
脉冲电路	ES	扭绞屏蔽电缆
模拟信号电路	S	扭绞屏蔽电缆
同步发电机—激励绕组	E	三芯或双股不屏蔽电缆
同步发电机—控制信号	S	双股扭绞屏蔽电缆
伺服直流放大器	S	双股扭绞屏蔽电缆
伺服保护电路	S	双股扭绞屏蔽电缆
低电平信号	S	双股扭绞屏蔽电缆
火警系统	S	双股扭绞屏蔽电缆
燃油油量表电缆	S	同轴电缆
通信天线馈线(发射)	X	同轴电缆
通信天线馈线(接收)	X	同轴电缆
视频电缆	S	同轴电缆
电话电缆	S	双股扭绞电缆
指示器电缆	S	同轴电缆
雷达发射传输线	X	波导管

5 屏蔽技术

屏蔽是利用屏蔽体阻止或减少电磁能量传输的一种措施，按屏蔽机理可分为电屏蔽、磁屏蔽和电磁屏蔽三种。屏蔽体的性能以屏蔽效能来度量，屏蔽效能定义为对给定外来源进行屏蔽时，在某一点上屏蔽体安放前后的电场强度或磁场强度之比值

$$SE = E_0/E_1 \text{ 或 } SE = H_0/H_1 \quad (9.4-10)$$

式中：SE 为屏蔽效能（倍数）； E_0 、 H_0 为无屏蔽体时某一点的电场或磁场强度； E_1 、 H_1 为安放屏蔽体后同一点的电场或磁场强度。

由于不同频率屏蔽效能的数值范围很宽，屏蔽效能常用

分贝（dB）表示

$$SE_{dB} = 20\log(E_0/E_1) \text{ 或 } SE_{dB} = 20\log(H_0/H_1) \quad (9.4-11)$$

屏蔽体的屏蔽效能与屏蔽体材料的电导率、磁导率及屏蔽体的结构、被屏蔽电磁场的频率等因素有关，在近场范围还与屏蔽体离场源的距离以及场源的性质有关。

5.1 电场屏蔽

虽然电子系统和设备中涉及的是时变电场，但用电路理论进行分析比用场论更简明，两个单元间的电场感应可看作是两者间分布电容的耦合。

5.1.1 电屏蔽体

电场感应示意图如图 9.4-13 所示，设干扰源 A 的电位为 U_A ，通过 AB 之间分布电容 C_1 和感应器 B 与地之间分布电容 C_2 的耦合，感受器 B 获得的感应电压 U_B 为

$$U_B = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_A \quad (9.4-12)$$

减小电场感应，减小干扰源和感受器之间的分布电容 C_1 ，或增加感受器对地分布电容 C_2 。在电路或设备布局时，应使干扰源和感受器尽可能远离，并把感受器尽可能贴近地面（底板、地线）安装。在干扰源和感受器之间加入电屏蔽也是减小两者间电场耦合的方法，屏蔽体接地或不接地对屏蔽效能的影响如图 9.4-14 所示。

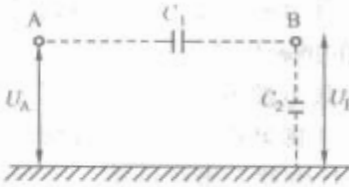


图 9.4-13 电场感应示意图

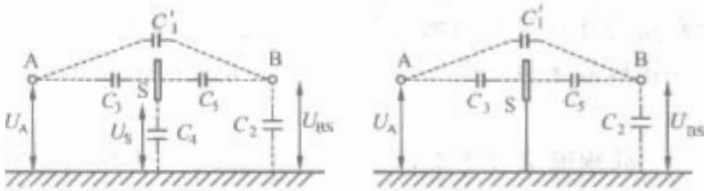


图 9.4-14 屏蔽体接地或不接地对屏蔽效能的影响

(1) 如果屏蔽体不接地，加入屏蔽体后可忽略 A、B 之间的剩余电容 C_1' ，则感受器 B 上的感应电压为

$$U_{BS} = \frac{C_3 C_5}{(C_2 + C_5)(C_3 + C_4 + C_2 // C_5)} U_A \quad (9.4-13)$$

如果 $C_3 \gg C_4$ 且 $C_2 + C_5 < C_1$ ，则 $U_{BS} > U_B$ 。可见屏蔽体不接地的情况下，有可能会增加 A、B 间的电容耦合。

(2) 如果屏蔽体接地，可认为式 (9.4-13) 中 $C_4 \rightarrow \infty$ ，所以 $U_{BS} \approx 0$ ，可获得良好的屏蔽作用。考虑 A、B 间剩余电容 C_1' 的作用，感受器 B 上的感应电压为

$$U_{BS} = \frac{C_1'}{C_1' + C_2 + C_5} U_A \quad (9.4-14)$$

由于 A、B 间剩余电容 C_1' 远小于屏蔽前的 C_1 ，所以 $U_{BS} < U_B$ 。实际的屏蔽作用，取决于屏蔽后 A、B 间剩余电容的大小。

屏蔽体 S 的接地阻抗对电屏蔽效能有很大影响。特别当屏蔽体通过导线接地时，接地阻抗与频率有关，地电流将在接地阻抗上产生压降，屏蔽体与地之间的电位差将使屏蔽效能下降。

5.1.2 电场屏蔽设计要点

为了获得有效的电屏蔽，在设计时必须注意下列几点。

- (1) 屏蔽体必须良好接地，接地点应靠近被屏蔽低电平元件的接地点，最好是屏蔽体直接接地。为减小屏蔽体上的电位差，电屏蔽体应选用铜、铝等良导体，为提高高频屏蔽效能，屏蔽体表面应镀银。
- (2) 屏蔽后的剩余电容影响电屏蔽效能，盒形屏蔽比板状或线状屏蔽有更小的剩余电容，全封闭的屏蔽体比带有窗孔和缝隙的屏蔽体更为有效。
- (3) 单就电屏蔽而言，对屏蔽体厚度无要求，但其结构强度和电阻应满足要求。

5.1.3 电场屏蔽的典型结构

- (1) 对电子设备内部的多级级联电路，为防止级间耦合，各级之间需进行隔离屏蔽。一般是共用一个屏蔽盒，级间用隔板分开，盖子与屏蔽体的接触电阻会影响屏蔽效能，一般可以用紧固螺钉或导电衬垫改善接触。可以每一屏蔽隔板间单独用盖子封闭（分盖结构），也可以各级屏蔽共用一个盖子（共盖结构）。分盖结构的屏蔽效能优于共盖结构，但成本较高，仅用在级间隔离要求较高的设备。
- (2) 变压器绕组之间存在着分布电容，电磁干扰信号会通过分布电容相互耦合，在两绕组间加电屏蔽可以减小这种耦合，变压器典型的电屏蔽结构包括以下几种。
 - 1) 带状屏蔽。在变压器的一、二次绕组之间绕上一层与绕组等宽的铜箔，在铜箔交叠处垫一绝缘层以防止铜箔在交叠处短路。带状屏蔽结构简单，应用广泛，但剩余电容较大。
 - 2) 双重屏蔽。双重屏蔽是在二次绕组的外层再按带状屏蔽的方式加一层屏蔽，内外两屏蔽层引出线并联后接地。双重屏蔽的屏蔽效能比带状屏蔽有明显的改善。
 - 3) 外折屏蔽。在一次绕组上绕一层宽度大于绕组的铜箔，二次绕组绕好后，将超出绕组部分的铜箔沿骨架四个棱边方向剪开，并向外弯折包住二次绕组，就构成了外折屏蔽。外折屏蔽可使剩余电容明显减小，但工艺较复杂，而且还要防止折弯处的铜箔与绕组两端的导线间发生电击穿。
 - 4) 封闭式屏蔽。封闭式屏蔽是将二次绕组用铜箔包封起来，在缠绕的起点与终点处同样要垫绝缘层，防止屏蔽层构成短路匝，其工艺复杂、成本高，仅使用在要求较高的场合。
 - 5) 超级隔离。三重屏蔽的交流电源超级隔离器，除分别对变压器的一次和二次绕组进行屏蔽外，还在已屏蔽的一、二次绕组之间再加第三层屏蔽。图 9.4-15 描述了各屏蔽层的接地方式，三重屏蔽的变压器一、二次绕组间的剩余电容可减小到 0.01pF，甚至 0.001pF 以下。为了达到有效的隔离，输入和输出线必须注意分离。交流电源超级隔离器一般采用变比等于 1 的结构形式，在计算机电源中应用较多。

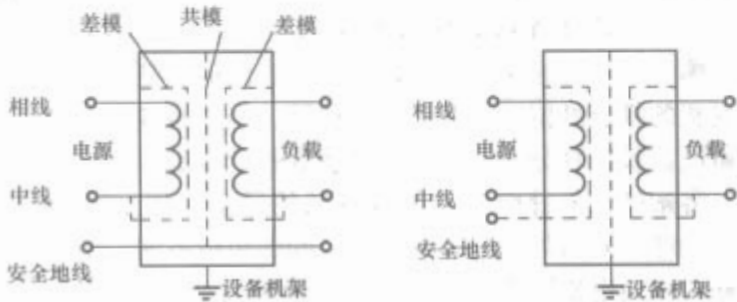


图 9.4-15 超级隔离器各屏蔽层的接地方式

5.2 磁场屏蔽

磁场屏蔽通常只是指对直流或甚低频磁场的屏蔽，其屏蔽效能远不如电场屏蔽和电磁屏蔽，在工程上抑制低频磁场干扰是一个十分棘手的问题。磁屏蔽的机理主要是依赖高磁导率材料所具有的低磁阻特性起磁分路作用，磁屏蔽体的屏蔽效能不仅与屏蔽体材料有关，还与屏蔽体的结构形式和具体的被屏蔽对象有关。

5.2.1 单层磁屏蔽的屏蔽效能

表 9.4-18 给出了三种典型结构的磁场屏蔽效能，提高磁屏蔽效能可选用高磁导率材料、适当增加屏蔽体壁厚，并且被屏蔽的磁心元件不应紧靠磁屏蔽体壁。

表 9.4-18 三种典型结构的磁场屏蔽效能	
屏蔽结构	屏蔽效能 (SE)
空心长圆管	$SE = 0.25 \mu_r \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]$ <p>式中：μ_r 为屏蔽材料的相对磁导率；r_1 为空心长圆管的内半径；r_2 为空心长圆管的外半径</p>
封闭式空腔	$SE = 1 + 0.22 \mu_r \left[1 - \left(1 - \frac{t}{r_e} \right)^2 \right]$ <p>式中：t 为屏蔽体的厚度；r_e 为与屏蔽体相同容积的等效球半径</p>
空心方形长管 (内含磁心元件)	$SE = 1 + 2 \mu_r \frac{l_2}{l_1} \frac{t}{d} \frac{2l_1}{2l_1 + d}$ <p>式中：t 为屏蔽体的厚度；d 为屏蔽空腔的边长 ($d \gg t$)；l_1 为屏蔽体的边长；l_2 为磁心元件与屏蔽体内壁的间隙</p>

5.2.2 多层磁屏蔽体的屏蔽效能

采用多层屏蔽可以降低屏蔽体的质量，在屏蔽材料总厚度不变时，增加两层屏蔽的间隙，可明显提高屏蔽效能。采用多层屏蔽时，一般靠近强磁场的材料用不易饱和的硅钢，而靠近弱磁场的材料可选高磁导率的坡莫合金，在安装时应保证各层间的磁绝缘。

5.2.3 磁屏蔽体的结构

屏蔽盒一般由板料经钣金加工或冷冲成形，结构上难免含有接缝或通风、观察用孔洞。若能在设计时考虑屏蔽体的接缝与孔洞的处理，则可减小它们对屏蔽效能的影响。

- (1) 在结构上要使屏蔽盒接缝处间隙尽可能小，而且接缝的布置要使接缝与磁通的流经方向平行，以减小缝隙对磁阻的影响。
- (2) 在电源变压器等发热元件的屏蔽盒上必须开通风孔，通风孔的形状与布置要尽量保持磁路的畅通，减小对屏蔽体磁阻的影响。
- (3) 屏蔽体上一些不可拆的接缝，最好采用连续熔焊工艺，熔焊应采用与本体材料相同的焊条。点焊和铆钉接缝应有足够的重叠，螺钉间距应尽量小。

5.2.4 磁屏蔽体的热处理

用于磁屏蔽的铁磁性材料，其磁导率除与材料成分有关外，还与材料的内应力有密切关系。机械应力的存在将大大降低其磁导率，例如坡莫合金经机加工后，材料内部机械应力可使其磁导率降低到 5% 左右。退火工序应安排在整个机加工过程的最后，退火工艺对磁导率影响很大，尤其是一些高磁导率材料，更应特别注意。

5.2.5 磁屏蔽体的设计要点

- (1) 磁屏蔽体应选用铁磁性材料，如钢、工业纯铁、硅

钢、高磁导率铁镍合金等。

(2) 磁屏蔽效能随壁厚的增加而提高,但壁厚一般不宜超过 2.5mm,否则加工困难。在单层屏蔽不能满足要求时,可采用双层甚至多层屏蔽结构。

(3) 屏蔽体上的接缝与孔洞的配置要注意方向,尽可能使孔、缝的长边平行于磁通流向,圆孔的排列要使磁路长度增加量最小。

(4) 根据磁屏蔽机理,屏蔽体不需接地,但为了防止电场感应,一般也接地。

5.3 电磁屏蔽

电磁屏蔽的机理与电场屏蔽和磁场屏蔽不同,它是用屏蔽体的吸收和反射作用来衰减电磁场。电磁屏蔽效能与电磁场及屏蔽体的特性有关,根据电磁屏蔽体的电气特性可分为实心型屏蔽和非实心型屏蔽两类。

5.3.1 实心型屏蔽

实心型屏蔽是一个结构上密实完整、电气上连续均匀、尺寸远大于波长的金属板或壳体,是不存在孔洞、缝隙等任何电气不连续因素的一个理想屏蔽体(见图 9.4-16)。在金属板与空气的两个分界面上,由于波阻抗的突变,一部分电磁波被反射称为反射损耗 R ;电磁波在金属板内传播时,金属板会消耗电磁波的能量称为吸收损耗 A 。两个分界面处电磁波的多次反射和透射,也影响实际透过金属板的电磁波强度,在屏蔽效能分析中考虑为多次反射修正因子 B 。金属板的电磁屏蔽效能可表示为

$$SE = A \times R \times B \text{ 或 } SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + B_{dB} \quad (9.4-15)$$

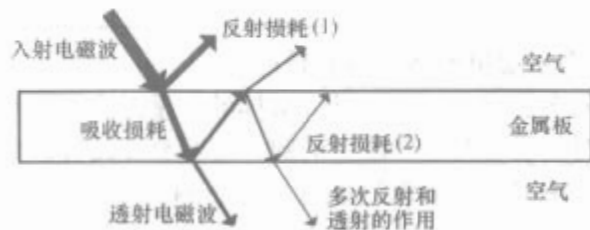


图 9.4-16 金属板电磁屏蔽的机理

5.3.1.1 吸收损耗

吸收损耗与金属板的电导率 σ 、磁导率 μ 和厚度 t 有关。频率为 f 的电磁波在金属中的集肤深度为

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (9.4-16)$$

一定厚度的金属板对电磁波的吸收损耗为

$$A = \exp(t/\delta) \text{ 或 } A_{dB} = 8.68t/\delta \quad (9.4-17)$$

铜的电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$,磁导率为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。采用相对于铜的相对电导率 σ_r 和相对磁导率 μ_r ,厚度以 mm 为单位,频率以 Hz 为单位,则金属板的吸收损耗为

$$A_{dB} = 0.131t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} \quad (9.4-18)$$

5.3.1.2 反射损耗

反射损耗与金属材料的电导率 σ 和磁导率有关。由于空气和金属的波阻抗不同,在金属板与空气界面处的反射损耗为

$$R = \left| \frac{(Z_w + Z_s)^2}{4Z_w Z_s} \right| = \left| \frac{(1 + K)^2}{4K} \right|$$

$$\text{或 } R_{dB} = 20 \log \left[\frac{|(1 + K)^2|}{4|K|} \right] \quad (9.4-19)$$

式中: Z_w 为空气的波阻抗; Z_s 为金属材料的波阻抗; $K = Z_s/Z_w$ 为金属与空气波阻抗的比值。

金属材料的波阻抗为

$$Z_s = (1 + j) \sqrt{\pi f \mu / \sigma} \quad (9.4-20)$$

空气的波阻抗与场源的距离和干扰场的性质有关。在电磁场理论中,把离辐射源距离 r 远大于 $0.5\lambda/\pi$ 的区域定义为远场区,而距离 r 远小于 $0.5\lambda/\pi$ 的区域定义为近场区。在屏蔽技术分析中,一般以为 $0.5\lambda/\pi$ 作为近场和远场的分界限。

对远区场,空气的波阻抗与频率无关

$$Z_w = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi = 377\Omega \quad (9.4-21)$$

在近区场域空气的波阻抗与场源性质有关。

(1) 当场源是电偶极子、杆天线或带有高电压小电流的元件与导线时,近区场主要是电场。对近区电场,空气的波阻抗为

$$Z_{we} = -j / (2\pi f \epsilon_0 r) \quad (9.4-22)$$

式中:距离 $r < 0.5\lambda/\pi$,近区电场波阻抗大于 377Ω ,也称高阻抗场或容性高阻抗场。

(2) 当场源是磁偶极子、环天线、线圈或低电压大电流的元件或导线时,近区场主要是磁场。对近区磁场,空气的波阻抗为

$$Z_{wm} = j2\pi f \mu_0 r \quad (9.4-23)$$

式中:距离 $r < 0.5\lambda/\pi$,近区磁场波阻抗小于 377Ω ,也称低阻抗场或感性低阻抗场。

5.3.1.3 多次反射

考虑金属板两个分界面的多次反射,损耗的修正因子为

$$B = 1 - \left| \frac{1-K}{1+K} \right|^2 \exp(-2t/\delta) = 1 - \left| \frac{1-K}{1+K} \right|^2 A^{-2} \quad (9.4-24a)$$

$$\text{或 } B_{dB} = 20 \log \left(1 - \left| \frac{1-K}{1+K} \right|^2 \times 10^{-0.1A_{dB}} \right) \quad (9.4-24b)$$

式中: K 与分界面反射有关;指数项与吸收损耗相关;多次反射修正因子 $B < 1$ 。如果吸收损耗 A 大于 10dB(相当于单次吸收 68.4%),可以忽略多次反射修正项。

(1) 当导电板的厚度小于其电磁波波长的 $1/4$ 时,称这种屏蔽层为薄膜屏蔽。薄膜屏蔽的吸收损耗 A 几乎可忽略,主要依靠反射损耗 R 衰减电磁波,此时多次反射 B 可能增加电磁波的透射。

(2) 当单层屏蔽不能满足需求时,可以采用双层甚至三层屏蔽。由于两屏蔽体间空气吸收损耗很小,电磁波的多次反射和透射有可能使多层屏蔽效能小于单层屏蔽效能之和。多层屏蔽结构中,各屏蔽层间只能在一处电连接,各层的固定应采用绝缘支柱。

5.3.2 非实心型屏蔽

实际的电子系统和设备中,理想的实心屏蔽体是不存在的。机箱通常有电源线、信号线和控制线等的穿入和引出,为通风、调节、显示等目的还需在机箱上开孔,箱体和面板组合存在缝隙等,难免有电磁场的泄漏,降低机箱的屏蔽效能,这种在电气上不连续的屏蔽称为非实心屏蔽。

5.3.2.1 缝隙的屏蔽

由于屏蔽体连接处接合表面不平、焊缝中有裂纹、螺钉、铆钉和点焊连接点间隔内出现不密闭的空隙等,都会在金属板的接合处留下一些细长的缝隙。当这些缝隙长度超过电磁波波长的百分之一时,就会造成较严重的泄漏。

屏蔽体上的缝隙对入射电磁场的屏蔽作用由两部分组成:①缝隙开口处的阻抗与自由空间的阻抗不同,引起反射损耗;②当电磁波透入缝隙后,在缝隙内产生的传输损耗。对于屏蔽板上的狭长缝隙,其反射损耗和传输损耗分别为

$$R_t(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{|(1+K)^2|}{4|K|}\right) \text{ 和 } A_t(\text{dB}) = 27.3t/g \quad (9.4-25)$$

式中: R_t 为缝隙处的反射损耗, dB; A_t 为缝隙的传输损耗, dB; g 为缝隙的长度 (一般小于波长的四分之一); t 为缝隙的深度; K 为缝隙波阻抗与空间入射波波阻抗的比值, 对距离为 r 的低阻抗磁场 $K=g(\pi r)^{-1}$, 对远区场 $K=j6.69 \times 10^{-5}fg$, 频率 f 以 MHz 为单位, 缝隙的长度 g 以 cm 为单位。

提高缝隙屏蔽效能常采用下列方法:

(1) 减小缝隙长度。使用螺钉、铆钉来紧固接合面是屏蔽箱盒壳体常用的紧固方法, 螺钉间距决定了缝隙可能的最大长度, 从提高屏蔽效能的角度, 要求螺钉间距越小越好。

(2) 增加缝隙深度。箱体活动端面的接合处是最常见的屏蔽体缝隙, 缝隙深度主要取决于屏蔽体的壁。若连接处加上旁边不仅便于紧固, 而且还增加了缝隙深度, 提高总的屏蔽效能。一般 6cm 的重叠长度可以使 2~200kHz 的屏蔽效能增加 25~10dB。

(3) 提高接合面的加工精度是减少漏缝的有效方法, 通常采用铸造成型加工、端面切削磨平和电焊接加工等可以取得较好效果。

(4) 通过在缝隙中加导电衬垫或涂导电涂料, 也可使配合表面有良好的电气接触, 减小缝隙电磁泄漏, 提高屏蔽效能。

5.3.2.2 孔洞的屏蔽

为满足被屏蔽对象的通风散热要求, 有时必须在屏蔽体上开设通风孔洞, 孔洞的能量泄漏是屏蔽体屏蔽效能下降的一个重要原因。孔洞泄漏与场源的特性、离开场源的距离、电磁场的频率、孔洞面积和孔洞形状等多种因素有关, 孔洞的屏蔽效能为

$$SE(\text{dB}) = A + R + B + K_1 + K_2 + K_3 \quad (9.4-26)$$

包括下列六项因子:

1) 矩形孔和圆形孔的吸收损耗分别为

$$A(\text{dB}) = 27.3t/W \text{ 和 } A(\text{dB}) = 32t/D \quad (9.4-27)$$

式中: t 为孔深, cm; W 为矩形孔的长边或垂直电场方向的边长, cm; D 为圆形孔的直径, cm。

2) 矩形孔和圆形孔的反射损耗为

$$R(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{|(1+K)^2|}{4|K|}\right) \quad (9.4-28)$$

式中, K 为波阻抗的比。对矩形孔的近区低阻抗磁场 $K=W(\pi r)^{-1}$, 远区场 $K=j6.69 \times 10^{-5}fW$; 对圆形孔的近区低阻抗磁场 $K=D(3.682r)^{-1}$, 远区场 $K=j5.79 \times 10^{-5}fD$; 频率 f 以 MHz 为单位, 近区干扰源的距离 t 以 cm 为单位。

3) 矩形孔和圆形孔的多次反射损耗为

$$B(\text{dB}) = 20\log\left(1 - \left|\frac{1-K}{1+K}\right|^2 \times 10^{-0.1A_{\text{dB}}}\right) \quad (9.4-29)$$

如果吸收损耗 $A > 10\text{dB}$, 可以忽略多次反射损耗。

4) 孔洞个数的修正系数

$$K_1(\text{dB}) = -10\log(nS) \quad (9.4-30)$$

式中: n 为孔洞密度, cm^{-2} ; S 为孔洞的表面积, cm^2 。上式仅适合于计算远大于孔洞间距的情况, 当干扰源与屏蔽体距离很近时应忽略该项。

5) 低频的修正系数

$$K_2(\text{dB}) = -20\log(1 + 35p^{-2.3}) \quad (9.4-31)$$

式中: p 为孔洞间导体宽度与集肤深度的比, 高频时可以忽略该项。

6) 相邻孔洞耦合修正系数

$$K_3(\text{dB}) = -20\log[\tanh(A_{\text{dB}}/8.686)] \quad (9.4-32)$$

提高通风孔屏蔽效能的措施:

(1) 把金属网覆盖在大面积的通风窗上, 减小等效孔口尺寸, 能显著地提高屏蔽效能。

(2) 用许多小孔代替大口径的通风孔是提高屏蔽体屏蔽效能的有效方法, 可以直接在屏蔽体上开许多小孔, 亦可单独制成穿孔金属板安装到屏蔽体的通风孔上。穿孔金属板不存在金属丝编织网交叉点接触电阻不稳定性的问题, 在屏蔽壁上直接开小口径通风孔工艺简单、成本低, 实际应用较普遍。

(3) 截止波导。当孔眼尺寸与电磁波波长可比拟时, 金属丝网和穿孔金属板的屏蔽效能都会下降。在甚高频以上, 既要有高的屏蔽性能, 又要通风良好, 可采用截止波导式通风孔板 (如蜂窝状通风孔板)。

截止波导式通风窗是根据电磁波在波导中的传播特性制成的, 当电磁波频率低于波导的截止频率时, 在传输中将产生很大的衰减。一般用于通风的截止波导结构有矩形、圆形和六角形, 它们的截止频率分别为

$$f_c = 15/a, f_c = 17.6/D \text{ 或 } f_c = 15/w \quad (9.4-33)$$

式中: f_c 为波导截止频率, GHz; a 为矩形波导宽边内尺寸, cm; D 为圆波导的内直径, cm; w 为六角形波导内壁的外接圆直径, cm。工程上一般取截止频率为干扰源最高频率的 5~10 倍。对低于截止频率 f_c 的电磁波在波导中传播时会衰减, 单个截止波导的屏蔽效能为

$$SE_{\text{dB}} = 1.823lf_c \sqrt{1 - (f/f_c)^2} \quad (9.4-34)$$

式中: 电磁波频率 $f < f_c$, GHz; l 为截止波导的长度, cm。由于截止波导的最大传输衰减与波导长度成正比, 工程上一般要求波导的长度大于波导横向尺度的 3 倍。实际的通风孔由大量截止波导并排构成, 形如蜂窝状 (称为蜂窝状通风孔), N 根波导管的屏蔽效能最多可比式 (9.4-34) 降低 $20\log(N)$ 。

5.3.2.3 表头孔的屏蔽

电子设备面板上往往装有指示参数的表头, 抑制表头孔的电磁泄漏可采取两种结构。

(1) 在表头背面采用附加的屏蔽结构, 面板与屏蔽体之间加入导电衬垫以减小缝隙, 改善电接触。穿入屏蔽体的表头引线由装在屏蔽体上的穿心电容器引入, 将引线感应的干扰信号旁路到地。

(2) 在表面上覆盖导电玻璃, 为确保导电玻璃与面板有良好的电接触, 通常在连接处加入导电衬垫。由于导电玻璃主要对电场和高频电磁场有屏蔽作用, 表头本身最好具有磁屏蔽作用, 或者采用带有细金属网夹层的导电玻璃, 这样对磁场也有一定的屏蔽效能。

5.3.2.4 调控轴的屏蔽

电子设备机箱内需要调控的元件 (如电位器和波段开关等) 常将传动轴自面板伸出, 电磁能量可能从伸出面板的轴向外泄漏或把外界电磁能量引入机箱内部, 破坏机箱的屏蔽效能。抑制调控轴泄漏通常有采用下列两种措施:

(1) 改善电接触。在调控轴上加装接地簧片, 以簧片的弹性压紧转轴, 既可以改善轴与机箱的电接触, 又不影响轴的灵活转动。或者在轴承内加装接地簧片, 簧片与轴和轴承之间均有足够的压紧力, 可减小转动时接触电阻, 使转轴保持与机箱同电位, 从而抑制电磁能量的泄漏。

(2) 采用截止波导。把调控轴的轴承做成圆波导,使其符合截止波导要求。如果采用绝缘材料制作调控轴,截止频率可以降低为空心波导的 $(\epsilon_r)^{-1/2}$,一般轴承长度大于3倍直径,这种结构能提供良好的屏蔽效能。

5.3.2.5 显示器的屏蔽

带有阴极射线管的电子设备,在阴极射线管的开口处电磁能量很容易泄漏。一般把阴极射线管的屏蔽罩与机箱连成一个整体,并保持电气上的连续。若阴极射线管屏蔽罩采用铁磁性材料,则能有效地实现磁屏蔽,使显示的图像不受周围杂散磁场的影响。

对于信息设备的显示器,关键是要防止信息从显示器屏幕等开口处向外界泄漏,常用覆盖导电玻璃、金属丝网或导电玻璃与金属网网的复合层等对显示屏进行屏蔽。

5.3.2.6 开关和指示灯的屏蔽

一般电子设备面板上均装有各种开关和工作状态指示灯,它们也可泄漏电磁能量。钮子开关的防泄漏安装结构是在面板与开关端面间衬入导电衬垫。按钮开关和指示灯的防泄漏可采用附加的屏蔽罩,引线的穿入处应采用穿心电容器或插针式滤波连接器,以防止电磁能量通过引线泄漏。较简单的指示灯屏蔽可在灯罩上覆盖导电玻璃,并使导电玻璃与面板保持良好的电接触。

5.3.2.7 电缆和电源线的屏蔽

(1) 当屏蔽电缆穿出或引入屏蔽机箱时,在入口处均要采用带有屏蔽的电缆连接器,以保证屏蔽体的连续性。安装电缆连接器时,应把配接表面上的不导电物质清除干净,确保连接器四周与机箱壁板间有良好的电接触。

(2) 屏蔽机箱的电源线必须通过电源滤波器才能引入机箱,滤波器应装在电源线的入口处。滤波器屏蔽罩必须与机箱壁板有连续而良好的电接触,不能破坏机箱的屏蔽。

(3) 单个熔丝座的屏蔽可用金属帽盖把熔丝座覆盖起来,帽盖内装弹性簧片使其与机箱有良好的电接触。多个集中熔丝座可采用附加屏蔽罩进行屏蔽。

5.3.3 实际屏蔽体的屏蔽效能

电子设备与分系统中实际使用的屏蔽体,如机箱、屏蔽盒等都不同程度存在各种电磁能量的泄漏途径,这些泄漏途径都会降低屏蔽效能。电磁场无论从屏蔽体内部空间穿透到外面,或者从外面透入到内部,都可以分为从屏蔽体材料中穿透或从屏蔽体电气不连续处泄漏两个途径。忽略不同途径泄露电磁场的相位差异,可按下式计算实际屏蔽体的屏蔽效能。

$$SE_{\Sigma} = -20 \log \sum_{p=1}^n 10^{-SE_p/20} \quad (9.4-35)$$

式中: SE_{Σ} 为实际屏蔽体的总屏蔽效能, dB; SE_p 表示各种因素的屏蔽效能, dB, 包括实心屏蔽及各种孔缝结构。如采用透射场与原场的相对比值, 可以表达为

$$\frac{1}{SE_{\Sigma}} = \sum_{p=1}^n \frac{1}{SE_p} \quad (9.4-36)$$

实际屏蔽体的屏蔽效能受到多种因素影响时, 对总屏蔽效能起决定性作用的是电磁能量泄漏最大(屏蔽效能最小)的那个因素。实心型屏蔽的屏蔽效能一般远大于影响屏蔽效能的其他诸因素, 实心屏蔽材料部分对总屏蔽效能影响很小。但实心屏蔽理论在指导屏蔽材料的选择和确定屏蔽方式等方面具有重要作用, 它是屏蔽设计的理论基础。

5.4 电磁屏蔽设计导则

电磁屏蔽可按下列程序进行设计。

5.4.1 判断干扰源、感受器及其耦合方式, 确定屏蔽对象

在采取屏蔽措施前, 首先弄清哪个是干扰源, 哪个是感受器, 它们之间通过什么方式进行耦合。一般来说高电平电路是干扰源, 低电平电路是感受器。有时干扰产生的原因往往很复杂, 可能有数个干扰源, 通过不同的耦合途径, 同时作用于一个感受器。在这种情况下, 首先要抑制较强的干扰, 然后再对其他干扰采取相应的抑制措施。一般仅需单独屏蔽干扰源或感受器, 但在屏蔽要求较高的场合, 干扰源和感受器都需要屏蔽。

5.4.2 确定屏蔽要求

根据电磁环境要求, 提出保证设备或分系统正常运行所必需的屏蔽效能值。对于接收机、测试仪器和控制系统等敏感设备, 可根据敏感度极限值和工作环境的电磁干扰场强确定其机箱的屏蔽效能。对于各种信号源、发射机和其他干扰场源, 可根据有关标准规定的辐射发射极限值和自身的辐射场强来确定所需要的屏蔽效能。

5.4.3 初步设计

根据屏蔽效能要求, 并结合拟采用的屏蔽体结构型式, 对式(9.4-35)中构成实际屏蔽效能的诸因素分别作出假定。其中, 实心型屏蔽的屏蔽效能至少比要求的屏蔽效能大20dB, 屏蔽体上最薄弱因素的屏蔽效能至少比要求的屏蔽效能大10dB。然后将各种因素代入式(9.4-35)计算总屏蔽效能, 若小于或远大于要求的屏蔽效能, 应对诸因素的屏蔽效能重新作出假定, 但起决定作用的是几个较薄弱的因素, 只要适当调整它们的屏蔽效能, 就能满足屏蔽要求。

5.4.4 协调屏蔽与其他要求的矛盾

对屏蔽的要求往往与其他方面的要求有矛盾, 如通风散热、易维护性、易观察性、体积、质量和成本等。不同电路的屏蔽要求也不同, 要求设计人员权衡利弊, 从获得较佳的费效比出发, 寻求最佳的设计方案, 以满足设备技术条件规定的各方面要求。

5.4.5 检查屏蔽体的谐振

屏蔽机箱或屏蔽盒可看作是一个波导谐振腔, 应检查在屏蔽体的工作频段内有无谐振频率点, 并要根据谐振所造成的影响, 采取相应措施。对于仅是屏蔽外来干扰的屏蔽体, 通常可以不考虑谐振的影响。

5.4.6 屏蔽体的结构设计

(1) 不论哪种材料, 当频率增高到某一界限值后, 其屏蔽效能主要取决于吸收损耗。这一频率界限值对于铁磁性材料(主要是薄钢板)大约是10MHz量级, 对于非磁性金属大约是1MHz量级。在频率高达1.5GHz, 钢的吸收损耗仍大于铜或铝, 为降低成本可优先考虑采用薄钢板。对于高Q值谐振回路的屏蔽盒, 采用薄钢板等铁磁性材料将引入较大的损耗, 使回路的Q值下降, 这时应选用铜、黄铜镀银或铝等良导体作屏蔽材料。

(2) 屏蔽体的结构形式应根据屏蔽要求进行选择。通常, 为了抑制150kHz以上的射频干扰, 采用薄金属板做成简单的单层屏蔽就可获得40dB左右的屏蔽效能。若要使单层屏蔽的屏蔽效能达到70~80dB, 就要认真进行屏蔽结构的完整性设计。为获得更高的屏蔽效能, 一般要采用双层屏蔽。如要对低频磁场和高频电磁波同时进行屏蔽, 就要采用铁磁性材料和高导电材料的复合屏蔽结构。

(3) 根据初步设计中假定的实心型屏蔽效能值, 计算屏蔽体壁厚, 一般应留有足够余量并保证有足够的机械强度和刚度。

(4) 屏蔽体上各种电气不连续处的屏蔽效能是总屏蔽效

能的决定因素，要特别注意那些电磁能量泄漏较大的因素，尽可能采取措施提高它的屏蔽效能。有些屏蔽体虽然选用最好材料并且有足够厚度，但屏蔽体完整性设计重视不够，仍不能达到预期效果。

5.5 屏蔽材料

5.5.1 金属材料的基本特性和屏蔽性能

铜的电导率和磁导率分别为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 和 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，规定其 $\sigma_r = \mu_r = 1$ ；铝相对于铜的电导率 $\sigma_r = 0.61$ ，磁导率 $\mu_r = 1$ ；钢相对于铜的电导率 $\sigma_r = 0.17$ ，低频的磁导率 $\mu_r = 1000$ ，但高频情况下相对磁导率会迅速下降（见表 9.4-19）。

表 9.4-19 钢的相对磁导率随频率变化											
频率 (Hz)	50	1k	10k	150k	1M	3M	10M	15M	100M	1G	1.5G
相对磁 导率	1000	1000	1000	1000	700	600	500	400	100	50	10

金属材料的吸收损耗与 $(\sigma_r \mu_r)^{1/2}$ 成正比，而反射损耗与 $(\sigma_r / \mu_r)^{1/2}$ 成正比。一般铁磁性材料的吸收损耗大于铜，而铜和银的吸收损耗大于其他非铁磁性材料，铜和银的反射损耗大于其他非铁磁性和铁磁性材料。

5.5.2 导电衬垫

导电衬垫是减小屏蔽体缝隙泄漏的重要材料，在屏蔽技术中被广泛应用。导电衬垫应有足够的弹性和厚度，以使衬垫和屏蔽体的两配合表面间有良好的电气接触。衬垫材料应是耐腐蚀的，而且在电化性能上要与屏蔽体的配合表面相容，以防止电化腐蚀。根据导电衬垫的材料种类与特性的不同，表 9.4-20 列出了常用导电衬垫的主要优缺点。

表 9.4-20 常用导电衬垫材料的主要优缺点		
材 料	主要优点	主要缺点
编织金属线网	为弹性最大的金属衬垫，法兰所需压力小，接触点多，可在各种厚度和弹性变形条件下使用，还可与氯丁橡胶和硅橡胶组合使用	不宜在薄片状态下使用，难以制成复杂的形状，厚度要在 1mm 以上
戳孔的铜镀合金带	最易刺破防护层	没有弹性，一般不能重复使用
嵌线式衬垫	对射频和流体有组合密封作用，锐利的线端能刺破氧化层	在同样效果的衬垫中，它的尺寸较大
软金属	价格低，适宜小间隙	属冷变形，弹性差
橡胶外包裹金属	弹性较好	若包裹的是金属箔，在错位时易撕裂
氯丁橡胶浸渍的编织铝网或铜网	具有射频和流体的组合密封作用，最薄的衬垫，可制成较复杂的形状	弹性差，需要的压力大，只适用于小于 1mm 的间隙
导电橡胶	射频和流体的组合密封	只能提供中等的组合密封
梳形簧片	最适用于滑动接触	易损坏，仅少数点接触
卷曲螺旋弹簧	需要的压力小，最大卷曲直径可达 25mm	在薄板接缝中不适用，不能制作复杂形状，最小直径 1.2mm

5.5.3 屏蔽用金属网

金属网屏蔽效能主要依赖各个网孔的反射损耗。在屏蔽

舱室或机箱的通风口上覆盖屏蔽金属网，能有效地抑制电磁能量的泄漏，这种金属网一般网丝较粗、网眼也较大。用于阴极射线管上的屏蔽，要求既能透光、又能屏蔽，则网丝较细，而且编织后尚须进行表面处理。为了提高其屏蔽效能及稳定性，各网丝的相交点最好能熔接；否则在环境气候作用下，交点处接触电阻增大，屏蔽效能将明显下降。

5.5.4 穿孔薄金属板

用穿孔薄金属板制成的屏蔽体，兼有通风与屏蔽的功能，屏蔽效能比金属网好、性能稳定。穿孔金属板的屏蔽效能随孔径增大而下降，随着孔间距增大屏蔽效能增加。

5.5.5 导电薄膜与导电玻璃、导电塑料

厚度小于 1/4 波长的屏蔽薄层称为导电薄膜，一般由金、镍、银、铝等金属采用真空蒸发、阴极溅射、化学沉积等工艺在相应介质材料上形成一层连续的导电层。薄膜的屏蔽效能几乎与频率无关，仅当厚度大于 1/4 波长时才开始明显增加。

当把导电薄膜附着于透明玻璃和塑料上时，就构成了既能透光又能起电磁屏蔽作用的导电玻璃或塑料，可用于表头、数码管、阴极射线管的屏蔽。在安装时，必须保证导电玻璃与机箱有良好的连续电接触。导电玻璃对电场和平面波有一定的屏蔽作用，但不能屏蔽磁场。

5.5.6 屏蔽喷涂料

用丙烯酸树脂和金属（常用银、铜和镍）微粒混和，再加适量的稀释剂和添加剂在球磨机中充分研磨和搅拌，就制成导电喷涂料。它可用喷枪直接喷涂在各类塑料机箱上，具有工艺简单、成本低的优点，屏蔽效能与喷涂层厚度和表面电阻有关。

5.5.7 导电布、导电纤维与导电纸

在化纤织物上镀以铜或镍后，对高频和微波具有良好的屏蔽性能，由于以化纤织物作基体称为“化纤镀金属导电布”，简称导电布。如把吸收电磁波的树脂层和导电布牢固地复合在一起，就构成了导电吸收布。它们对电场和平面波场有很好的屏蔽效能，在 0.1~1GHz 频段内的电磁屏蔽效能约 50~60dB，可以制成各种射频和微波防护服、屏蔽帐篷、遮蔽层和灵敏电子设备的附加保护屏套。

导电纤维是用导电性能良好的金属或碳黑制成的纤维，或使用部分良导体与化纤混合制成的纤维，亦可直接对化纤进行导电化处理制成，其导电性能可进行人为地控制。用它们织成的布料称之为导电织物，可缝制成各种防静电或防电磁辐射的工作服，亦可用作屏蔽窗帘、屏蔽套等。

利用化学电镀法在聚酯纤维、玻璃纤维或云母上镀镍或铜形成导电纤维，再与木浆混合，就可制成具有电磁屏蔽作用的导电纸。这种导电纸在 10MHz~1GHz 频段内的电磁屏蔽效能约 30~40dB，每平方米质量仅为 80g，强度与普通纸相同，可贴附在电子产品塑料机壳内使机壳具有屏蔽作用，也可用于敏感器件的屏蔽包装。

5.5.8 导电胶和导电填隙胶

导电胶一般由环氧树脂与银粉混合配制而成，其体电阻率为 $0.001 \sim 0.02 \Omega \cdot \text{cm}$ ，使用温度范围为 $-60^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 。导电胶在常温下能固化，固化后的剪切强度为 840kPa，拉伸强度约 1750kPa。用导电胶粘结的连接属永久性连接，难以拆卸，不适用于非永久性连接。

导电填隙料是一种具有一定黏稠性且不会固化的导电胶，体电阻率为 $0.005 \sim 0.02 \Omega \cdot \text{cm}$ ，使用温度范围为 $-60 \sim 204^\circ\text{C}$ 。主要用途是对各种屏蔽体的非永久接缝进行射频密封，还可保护接缝，防止潮气和腐蚀性气体侵入。

5.5.9 导电润滑脂

导电润滑脂一种银—硅黏糊状液体, 常用在电力配电系统的电力闸刀开关上, 能减少启闭时的飞弧现象, 降低电磁噪声。在屏蔽技术中, 可用于伸出屏蔽机箱的各种转动或滑动轴承中, 以改善转轴与屏蔽机箱的电接触, 减小电磁泄漏。导电润滑脂的体电阻率约 $0.02\Omega\text{cm}$, 使用温度范围为 $-53^{\circ}\text{C}\sim 232^{\circ}\text{C}$, 具有良好的防潮性能, 对金属无腐蚀作用。

5.5.10 导电橡胶

用导电橡胶制成的导电衬垫兼有电磁屏蔽和流体密封的作用, 可制成各种截面形状和结构外形, 适应各类屏蔽体接缝的需要。导电橡胶的, 体电阻率为 $10^{-5}\Omega\text{cm}$ 数量级, 工作温度为 $-55\sim 160^{\circ}\text{C}$ 。

5.5.11 常用磁屏蔽材料

磁屏蔽体要求采用相对磁导率远大于1的铁磁性材料, 常用的材料有普通低碳钢、硅钢、电工纯铁、铁镍合金和铁铝合金等。

(1) 用于磁屏蔽的低碳钢 (含碳量小于0.25%), 成本低、加工方便, 广泛用于屏蔽室、电源变压器的屏蔽盒、屏蔽机箱等, 在数kHz~数GHz的频率范围内均有较好的屏蔽性能。

(2) 电工纯铁的含碳量在0.04%以下, 杂质含量愈小磁性能愈好。磁屏蔽常用杂质含量中等的纯铁, 称为电磁纯铁, 饱和磁感应强度在1.5T以上。

(3) 硅钢片是由含硅量0.5%~4.5%的铁合金轧制而成的薄板状材料, 也可用来制造磁屏蔽体。因其相对电导率较低, 只适宜于作低频磁屏蔽。

(4) 铁镍类合金 (坡莫合金) 是一种性能优良的磁屏蔽材料, 磁导率随含镍量的多少而变化。机械应力对磁导率有很大影响, 在机械加工完成后, 必须进行热处理, 要求在真空或氢气中退火。其磁导率随频率的升高而下降, 当频率达100kHz以上时, 其磁导率已不如普通碳钢, 一般只适用于较低频率的磁屏蔽。

(5) 铁铝合金饱和磁感应强度约0.8T, 具有较高的磁导率, 有些场合可代替铁镍合金。机械应力对其磁性能的影响不大, 应力5MPa时磁导率仅下降36%且去掉应力后磁性能基本恢复。

(6) 非晶态软磁合金具有优良的机械、物理和化学性能, 是一种新型的软磁材料, 磁导率和矫顽力与铁镍合金基本相同, 具有良好的抗腐蚀特性, 机械应力对磁性能影响比铁镍合金小。制成的箔带料可编织成大面积的屏蔽材料, 可裁制成各种形状、还可以冲孔。

5.6 船舶屏蔽舱室

屏蔽舱室是保护电子设备、分系统免受干扰危害的金属封闭体, 不仅可以防止外部电磁干扰进入屏蔽室, 而且可以防止室内大功率高频装置向外泄漏干扰场或信息处理设备向外泄漏有效信息。由于船舶工作环境的特殊性, 屏蔽舱室均采用不可拆的焊接式结构, 对于钢板采用连续熔焊, 铜箔则用软钎焊, 屏蔽舱室一般应满足下列基本要求。

(1) 所有金属舱壁、地板、顶板的门窗应形成一个连续导电面, 其面上任何两点的直流电阻应不大于 $10\text{m}\Omega$ 。屏蔽室应与地良好搭接。金属屏蔽室应与船体焊接一体, 非金属屏蔽室应与接地系统的主接地电缆或接地螺栓单点接地。

(2) 无关的金属管路、波导管、电缆及管道等应避免进入屏蔽舱室, 进入屏蔽舱室的所有电缆屏蔽层、金属管路及波导管应在贯通处进行良好的接地。进入屏蔽舱室的电源线

应安装电源滤波器, 并紧靠屏蔽舱室外侧安装, 波滤波器壳体应良好接地。

(3) 所有贯通屏蔽舱室的电缆, 应使用带外护套的屏蔽电缆或将带有绝缘外护套的电缆穿入金属导管中, 并在贯通处周围一圈实施接地。

(4) 船舶屏蔽舱室, 在15kHz~10GHz的频率范围内, 距舱壁30cm处的场强应不大于 $90\text{dB}\mu\text{V/m}$ 。屏蔽舱室内有电源传导发射要求的设备、分系统, 其供电的接线箱处传导发射值应满足 GJB 151A/152A—1997 要求。

(5) 屏蔽舱室应设在船舶上电磁环境电平较低区域, 如屏蔽效能达不到要求, 可采用双层屏蔽的套间式屏蔽室。屏蔽舱室尽量少开门、窗、通风口, 必须设置的门、窗及开孔, 应尽量面向弱场区方向或在内通道上。

6 搭接与接地

正确的搭接与接地是保证电子系统和设备实现电磁兼容性的重要手段之一。

6.1 搭接

搭接是通过机械或化学方法使金属物体间实现电气连接, 在两金属物体之间建立一条供电流流动的低阻抗通路。搭接的目的主要是建立稳定的信号电流通路, 提供故障电流的回流通路, 防止静电电荷积累, 降低机箱和壳体的射频电位, 保护设备和人身安全。

不同目的搭接对电阻值的要求不同。例如, 仅用于防止静电电荷的场合, 允许 $50\text{k}\Omega$ 搭接电阻; 为了降低噪声, 则要求低于 $50\text{m}\Omega$ 的搭接电阻; 对雷电放电或强大故障电流的搭接电阻必须非常低。一般直流搭接电阻小于 $1\text{m}\Omega$ 属于高质量的搭接, 对高频情况电阻并不是搭接性能的可靠指标, 必须考虑驻波效应、通路谐振以及导体的固有电感和杂散电容等因素。

6.1.1 接触电阻

接触电阻是搭接质量的主要参数。一般金属表面都有许多高低不平的峰谷, 即使最光滑的商品型金属表面也有 $0.01\sim 0.02\mu\text{m}$ 的均方值粗糙度, 大多数电气搭接表面的粗糙度比上述数值大几个量级。两表面配接只在峰顶 (称为粗糙点) 上接触, 实际供电流流动的接触面积比金属接触的视在面积小得多。电气接触的实际面积为接触点面积之总和, 影响直接搭接电阻 (接触电阻) 的因素主要有表面杂质、表面硬度、接触压力和搭接面积。

(1) 表面杂质。铁和铝等较活泼的金属会很快氧化而形成表面薄膜, 而金、银和镍不易氧化。如果表面的氧化膜比接触材料软得多, 氧化膜在粗糙点之间易被挤破, 从而建立起一种准金属的接触。但是较硬的氧化膜会限制实际导电接触面积, 在搭接 (甚至在焊接) 前必须通过热、机械或化学方法把氧化膜除去, 以便建立连续的金属通路。

(2) 表面硬度。在给定的负荷下, 较软金属的粗糙点会产生较大的可塑变形, 建立较大的金属接触面。在软材料和硬材料相互搭接时, 较软的材料会适应硬材料的表面形状, 从而使产生的接触电阻比两种硬材料所形成的接触电阻更低。

(3) 接触压力。黄铜较软且无绝缘的氧化膜, 接触压力对搭接电阻影响很小; 铝虽然也较软, 但其氧化膜的绝缘特性使铝的搭接电阻在大于 8.2MPa 下才达到最小值; 钢比较硬且易形成氧化层, 在 10.5MPa 下搭接电阻仍与压力有一定关系。

(4) 搭接面积。大的搭接表面能增大电流通路的横截面积,并相应增加表面金属间的真正接触点,使搭接电阻减小。在电源故障或严重的雷电放电时,大的接触面积还可以减小可能发生的电流挤集现象。这种电流挤集现象所导致的有效搭接电阻会比小电流流动时所呈现的搭接电阻更高,使搭接处的电压升高,在搭接处产生更大的热量。

6.1.2 直接搭接

直接搭接是在互连的元件之间不用辅助导体而直接建立一条有效的电气通路,直接搭接可能是永久性的或半永久性的。永久性搭接是指在装置的预期寿命中,保持在原安装位置上并不要求拆卸的那些连接。为了进行系统更改和测量等原因可能需要断开的接头,以及由于成本缘故不易进行永久性搭接的接头,可以采用可拆式搭接,这类连接点称为半永久性接头。直接搭接可通过熔焊、硬钎焊、软钎焊把两金属搭接在一起,亦可利用螺栓、铆钉或夹箍在配接表面间保持高压来获得电气连续性。

6.1.2.1 熔接

熔接是可以提供最理想电气性能的搭接方法,永久性的搭接头应尽量采用熔接。熔接产生的超过 2200℃ 高温,足以汽化污染的薄膜或外界物质,在接合处形成一种连续的金属桥路,其电导率一般接近搭接零件本身的电导率,机械强度可以接近或超过搭接元件本身的机械强度,接头寿命与搭接元件寿命一样长。

在一般搭接结构中所碰到的大多数金属,可以利用诸如气焊、电弧焊、氩弧焊等标准方法进行熔接。另一种有效的熔接方法是放热熔接工艺,利用一个石墨模,把铝、氧化铜和其他粉末的混合物盛装在接头周围适当的地方,通过混合物燃烧所产生的高温把氧化铜分解,从而在连接点周围产生一单质的铜膜。由于高温铜材料可以与钢或铁进行搭接,同时亦可与其他铜材料搭接,特别适用于电缆与电缆、钢棒、工字钢或其他结构件的熔接。

6.1.2.2 硬钎焊

硬钎焊(包括银焊)是永久连接中另一种焊接工艺。在硬钎焊中,把搭接的表面加热至 450℃ 以上,但低于搭接零件熔点,要向受加热的零件施加填充的金属和适当的焊剂来浸湿连接的表面,以保证钎焊焊料与搭接表面之间的紧密接触。硬钎焊接头的电阻亦基本为零,但由于使用与原搭接零件不同的金属,必须采取措施保护接头免受腐蚀损坏。

6.1.2.3 软钎焊

软钎焊是一种常用的、比较简单的搭接工艺,焊接温度较低,主要用于铜、锡或锡等高电导率金属的搭接,利用合适的焊剂也可焊接铝和其他金属。适当地施加相容材料,利用软钎焊所形成的搭接,其搭接电阻几乎和熔焊、硬钎焊所形成的电阻一样低。但软钎焊熔点低,在可能出现大电流场合不应把软钎焊料用作主要的搭接材料。电气规程中规定,不允许将软钎焊搭接用在故障保护接地电路上;在雷电保护规程中也规定,不允许在雷电保护网络的零件之间采用软钎焊进行互连。

6.1.2.4 螺栓连接

螺栓连接是最普通的非永久搭接方法,螺栓(或螺钉)仅起紧固件的作用,一般在搭接面之间提供 8~10MPa 的紧固力。虽然螺栓或螺钉可以对流过接头的电流提供一条辅助通路,但主要的电流通路应通过金属界面来建立。紧固件的尺寸、数量和间隔应满足整个搭接面上压力的要求,在螺栓头部下面放置一个大的刚性垫圈,可以增加有效的接触面积。由于螺纹连接的可靠性差,因此决不能采用自攻螺钉进

行搭接。

6.1.2.5 铆接

铆接比螺栓连接的灵活性差,又没有熔接、硬钎焊或软钎焊能对搭接表面防腐的保护能力,铆接的主要优点是可以利用自动工具快速而一致地进行。铆接的电流通路一般要通过搭接元件和铆钉体之间的界面,铆钉与搭接零件之间的配合比搭接零件之间配接表面的状态更为重要。因此,铆钉孔的尺寸必须保证在装配之后与铆钉形成紧配合,铆钉孔的整个边缘必须除去油漆、腐蚀物质或其他非导电材料。

6.1.2.6 导电黏合剂

导电黏合剂是一种添加有银粉的双组分环氧树脂,固化后可形成一种导电材料,可以在配接表面之间使用以产生低电阻的搭接,特点是不需要施加热量就能获得直接搭接。在许多地方,焊接的热量可能会造成火灾或爆炸的危险。在螺栓搭接中采用导电黏合剂时,黏合剂可提供一种有效的金属般连接桥路,具有很高的防腐能力和机械强度。

6.1.3 间接搭接

在某些情况,由于操作要求或设备位置的关系,往往不能进行直接搭接。当设备的各部分之间或设备与其参考平面之间必须在结构上分离时,需要引入辅助导体作为搭接条或搭接片。通常使用搭接条把需要防雷击设备连接至结构的接地参考系统上,也常用于旁路配电箱盖板或设备盖板上的铰键等结构元件以消除大电流产生的宽带噪声。

间接搭接的阻抗等于搭接导体固有阻抗和两端头处接触阻抗的总和。搭接条的阻抗由所用材料电阻率和搭接条尺寸确定,一般铝、铜或黄铜搭接条总电阻应小于 0.1mΩ。若需要采用长的搭接条,搭接导体固有阻抗可能是主要的。

(1) 集肤效应使高频电流集中于导体表面,降低了导体的有效导电截面,所以搭接条的高频交流电阻会明显高于其直流电阻。

(2) 由于搭接条存在自感,即使在相当低的频率也应考虑搭接条的感抗。长直非磁性矩形截面和圆形横截面搭接条的自感近似为

$$L_R = 0.002l \left[2.303 \log \left(\frac{2l}{b+t} \right) + 0.5 + 0.2235 \frac{b+t}{l} \right] \quad (9.4-37)$$

$$L_C = 0.002l \left[2.303 \log \left(\frac{4l}{d} \right) - 1 \right] \quad (9.4-38)$$

式中: L_R 、 L_C 分别为矩形和圆形搭接条的电感, μH ; l 为搭接条长度, cm; b 和 t 为矩形搭接条的宽度和厚度, cm; d 为圆形搭接条的直径, cm。

随着搭接条长宽比的减小,其相对感抗会明显下降,对于射频搭接要求搭接条长宽比为 5:1 或更小的 3:1。编织搭接条阻抗与实心搭接条阻抗并无显著差别,编织具有较大的柔性应用也较多,但编织搭接条容易受到腐蚀,在某些位置上不能使用编织搭接条。

(3) 在搭接条与被连接的物体之间,以及被连接物之间会呈现一定量值的杂散电容 C_s 。实际搭接条的等效电路,可采用搭接条电阻 R_s 与搭接条电感 L_s 串联后,再与杂散电容 C_s 并联。除了非常短的搭接条,一般搭接条感抗远大于其电阻。如频率高于 100kHz,可以忽略 R_s ,此时搭接条的等效阻抗近似为

$$Z_s = \omega L_s / (1 - \omega^2 L_s C_s) \quad (9.4-39)$$

在一些典型结构中谐振频率 $f_r = 1/(2\pi \sqrt{L_s C_s})$ 可能低至 10~15MHz,在谐振点附近搭接通路的阻抗可达几百欧,将使搭接失效。在搭接的高阻抗区域,搭接系统相当于

一个辐射天线，将增加被搭接系统的辐射干扰。在设计和使用时，应确保搭接条不引起不希望的干扰。

6.1.4 搭接表面

6.1.4.1 搭接表面处理

为了获得有效而可靠的搭接，应使用机械或化学方法清除搭接表面杂质，为避免再次污染，清除后尽快组装。

(1) 搭接表面上的灰尘、污物、碎屑、纤维、锯末和包装材料等固体物质，通常用刷扫或揩擦等机械方法清除。应细心清除槽隙和孔眼的杂质，压缩空气泵是一种较有效的方法。

(2) 可采用化学溶剂清除油漆、油墨、清漆等有机化合物保护物。如果清洁剂无效，可使用机械方法，但应防止从表面上磨去过多的材料。

(3) 对金、银、镍、镉、锡和铱之类的金属镀层，可使用刷擦方法把镀层上固体杂质除去，并利用适当的溶液清除表面的有机杂质，这些镀层很薄，不能使用酸类等强腐蚀剂。铬酸盐镀层能提供低的搭接电阻且具有防腐保护，不应除掉；铝表面阳极氧化处理后的氧化膜是绝缘层，搭接前必须除去。

6.1.4.2 搭接金属的相容性

搭接头为两种不同金属时，可能产生电化腐蚀，直接接触的金属应尽可能选用电位序靠近的金属。表 9.4-21 给出了常用金属的相容组别，组别相差越大的金属相互接触时，电化腐蚀作用越严重。

表 9.4-21 常用金属的相容组别

组别	I	II	III	IV	V
金属	镁	铝、铝合金、 锌、镉	碳钢、铁、 铅、锡、铅-锡 焊料	镍、铈、不 锈钢	铜、银、 金、铂、钛

6.2 接地技术

在电子设备中，接地是抑制电磁噪声和防止电磁干扰的重要方法之一，正确地配合使用接地和屏蔽，对电子设备的电磁兼容性将起到事半功倍的作用。

6.2.1 设备和系统的接地类型

电子设备或系统的信号地有悬浮地、单点接地、多点接地以及组合式接地多种类型，图 9.4-17 给出三种基本接地方式的示意图。

6.2.1.1 悬浮地

对电子设备而言，悬浮地是指设备地线系统在电气上与大地系统及其他导电结构相绝缘，以避免接地系统的电磁干扰影响设备。有些电子设备中，为了防止机箱上的干扰电流直接耦合到信号电路，有意使电路单元的信号地与设备机箱绝缘。

悬浮地设备容易产生静电积累，当电荷达到一定程度后，会产生静电放电。在雷电环境下，静电感应产生的高压

会在设备机箱与其内部其他部件间产生飞弧，甚至使操作人员遭到电击。并且电网相线与设备机箱短路时，有引起触电的危险。所以悬浮地方式不宜用于通信系统和一般的电子设备。

6.2.1.2 单点接地

单点接地的设备中，信号电路先参考于一点，然后把该点接至设施的接地极。单点接地系统应尽量避免使地线构成回路，在配置上经常使地线成为树叉状。在结构上有独立接线排的单点接地系统、公共母线的单点接地系统和采用主接地板和支路接地板多级单点接地三种形式。单电接地系统一般适用于低频设备与系统，在地线设计中应注意下列几点。

(1) 为防止工频电流及其他杂散电流在信号地线上产生电位差，信号地线与电源地线及安全地线之间应绝缘。信号地线的走线，应避免与电源线等载有大电流的导体平行。

(2) 信号地线不能用作从负载到信号源之间的信号电流返回通路，最好使用对称馈线传输低频信号，使信号的进入线和返回线相对于信号地线对称。

(3) 从接地端子引出的接地导体应接到电子系统接地网络的一个连接点上，该连接点同时应该是这个低频设备的安全地线及电源地线与接地极的连接点。

(4) 应尽量减小信号地线的敷设长度，为了保证足够的机械强度和低阻抗通路，应选用长宽比小的搭接条。

6.2.1.3 多点接地

多点接地系统的各种电子设备采用多条导电通路与设施的多个接地极相连，设备和电路多处与该接地网络连接，在接地网络上的任何两点之间都存在几条并联通路。多点接地能简化综合设备内的电路结构，是高频信号电路唯一实用的接地方式。

多点接地系统在射频时会呈现出传输线特性，为了使多点接地有效，当接地导体长度超过最高频率信号波长的 1/8 时，多点接地系统需要一个等电位接地平面。等电位接地平面对电流流动呈现一个可以忽略的低阻抗，一般含有大量导电材料，如连续的实心金属板或夹在地板中的铜格栅等。

6.2.1.4 混合式接地

一般电子系统中既有低频电路又有高频电路，低频电路部分宜采用单点接地，而高频电路需采用多点接地，因此需要混合方式的接地设计。可以把设备的地线分成电源地与信号地两大类。设备中各部分电源的地线都接到电源总地线上，所有信号地都接到信号总地线上，两根总地线最后汇总到一个公共入地点。

在信号地中，根据不同的工作频率可采用相应的单点或多点接地方式。一般单点接地的应用频率为 30kHz 或 300kHz 以下（特殊场合亦可用到 3MHz），多点接地的应用频率为 30kHz 或 300kHz 以上，各种接地方式的使用频率范围应根据设备或系统的具体情况来选择。

6.2.2 电路和设备的接地

6.2.2.1 单元电路和多级电路的接地

对于单元电路来说，最好是一点接地，以免构成较长的

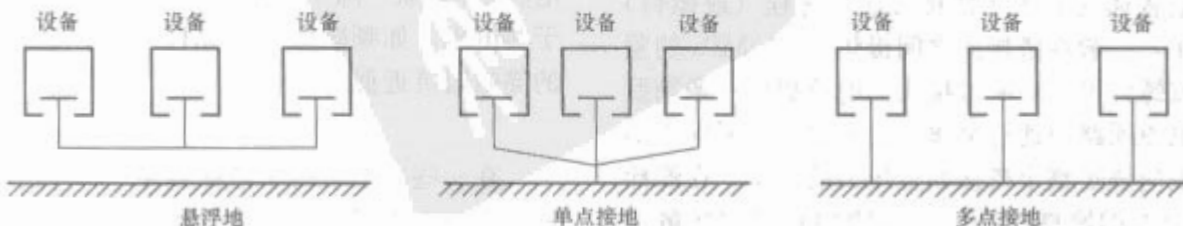


图 9.4-17 三种基本接地方式

共用地线。由于地线不是理想的零阻抗,多点接地时地线中电流会造成不同接地点的电位差,尤其在晶体管的输入端会引入由地电流形成的干扰电压,使电路工作不稳定甚至失误。

多级电路各级之间一般也采用单点接地,前级弱信号放大器地线应与末级功率放大器和其他高频电路、高电平电路的地线尽可能分开。多级电路接地点应选在低电平电路的输入端,可以缩短输入级的接地线,使其最接近于基准地电位,有效减小受干扰的可能性。

6.2.2.2 复杂电子设备的接地

一些复杂电子设备中往往包含有多种电子电路和各种电动机、电器等部件,根据电路的电气特性分组敷设地线,是解决地线干扰行之有效的方法。一般分为信号地线(还可分高电平和低电平地线)、噪声地线和金属件地线,常称之为“三套接地法”或“四套接地法”。

6.2.2.3 信号电路屏蔽罩的接地

为防止多级小信号放大器和高增益放大器自激,通常应对它们进行屏蔽,屏蔽效能除与屏蔽罩自身结构有关外,接地方式也是一个很重要的因素。

(1) 单层屏蔽罩如果不接地,放大器输入端、输出端及地线与屏蔽罩之间的分布电容会构成电容反馈网络,可能导致放大器自激。放大器屏蔽罩应单点接地,接地点应选在输出端地线上,既可以消除输出端对输入端的耦合干扰,又可以避免地环路产生的干扰。

(2) 对某些弱电平、高灵敏度的信号电路,为了提高工作稳定性,有时需采用双层屏蔽。内、外屏蔽罩的接地及两层屏蔽罩间的连接都应在信号电路的输出端,以缩短回路路径,减小地环路面积,提高屏蔽效能。

6.2.3 地线中的干扰

任何实际的地线既有电阻又有电抗,当有电流通过时地线上必然产生压降。并且地线还可能与其他信号线、电源线等形成环路,任何交变磁场都会在地环路中产生感应电动势。不论是地电流在地线上产生的压降,还是地环路引起的感应电动势,都有可能使共用该地线的各电路单元产生相互干扰。在电磁兼容性分析中,地线不能看成是等电位的,地线干扰是造成设备和系统内部各单元之间耦合的重要因素之一,图9.4-18是地线干扰的等效电路。

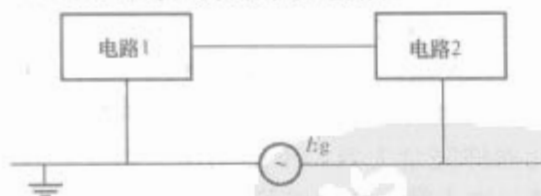


图 9.4-18 地线干扰的等效电路

$$E_g = I_g(R_g + j\omega L_g) - d\phi/dt \quad (9.4-40)$$

式中: E_g 为地线中的等效干扰电动势; I_g 为流过地线的干扰电流; $R_g + j\omega L_g$ 为地线的交流阻抗(由电阻和电感两部分构成); $d\phi/dt$ 为穿过地环路的交变磁场产生的感应电动势。根据地线中干扰形成的机理,减小地线干扰必须减小地线阻抗和地环路面积。

(1) 变压器耦合可以隔断两电路单元之间的地电流干扰回路,隔离效果与变压器绕组间的分布电容 C 和负载 R_L 有关。由于分布电容的影响,变压器主要用于抑制低频干扰,有效抑制频率范围

$$f < 1/(2\pi R_L C) \quad (9.4-41)$$

提高变压器的干扰抑制能力,可以减少变压器绕组间分

布电容 C 或减小被干扰电路的负载电阻。

(2) 当传输的信号中含有直流分量时,不能采用变压器耦合传输信号。采用共模扼流圈(中和变压器)能有效抑制地线中的干扰,而对有用信号几乎无损耗。

(3) 两电路单元间采用同轴电缆传输信号时,如果屏蔽层两端接地,芯线与屏蔽层类似共模扼流圈,也能抑制地环路干扰。由于屏蔽层电感 L_s 较小,低频时屏蔽层电阻 R_s 相对较大,同轴电缆仅对较高的频率才有抑制作用。

$$f_s > R_s/(2\pi L_s) \quad (9.4-42)$$

式中: f_s 为同轴电缆抑制地环路干扰的截止频率,一般为 $0.6 \sim 2\text{kHz}$ 。降低截止频率,需要增大屏蔽层电感,可在同轴电缆上套装高磁导率的磁环,由于措施简便被广泛采用。

(4) 切断两电路单元间地环路最有效的方法是采用光耦合器。由于光耦合器中电流与发光强度的线性关系较差,传输模拟信号时会产生较大的失真,所以主要应用于数字信号传输系统。使用光耦合器时,两电路必须分别供电,以防止电源线的干扰耦合。

(5) 由于地线具有一定的阻抗,地线中的电流会在信号电路的两接地点之间产生电位差,非平衡输入放大器会放大该干扰电压。采用具有平衡输入的差分放大器,可以有效抑制地线干扰。对于非平衡输入的放大器,也可采用变压器改成平衡输入。

6.2.4 船舶设备接地要求

金属船上除了通常以船体作地电位外,熔焊或钎焊到船体上的设备机架、基座、结构及其他大金属件可认为是船体的扩展,同样可作地电位。非金属船应安装专用的接地系统,一般由两块接地板和接地缆组成。接地板安装在船体龙骨左右两侧,与海水接触的接地板电位规定为地电位,与接地板相连接的接地电缆是接地板的扩展,也是地电位。

7 系统的电磁兼容性设计

船舶系统包含上10个分系统和上百台设备,系统内多数电磁发射器和电磁接收器共场地、共空间,彼此既有有用的信息传输,又有众多不同形式的无意能量耦合。无意能量可能对有用信息传输造成中断、阻塞、误码,使系统工作性能降低或不能完成预定的任务。因此需要对船舶系统进行电磁兼容性设计,以消除或减少无意能量耦合对系统功能的影响。

7.1 系统电磁兼容设计的指导思想

7.1.1 电磁兼容与系统功能

系统电磁兼容性设计就是把系统的电磁兼容性要求综合进系统的功能性设计中去。从以下两方面考虑,一般能获得较好的效果。

(1) 对具有多个分系统和设备的系统工程来讲,应把电磁兼容性设计与系统各个功能设计阶段结合进行。一般从方案论证阶段初期开始,贯穿到方案阶段、工程研制阶段、定型阶段、生产和试用阶段。各阶段的设计内容,应作为阶段功能性设计评审内容的一部分。

(2) 应把系统电磁兼容性综合进分系统和设备的电磁兼容性要求,同该级的功能性设计一起进行,并将其作为相应阶段设计评审内容进行评审。

7.1.2 兼容性与功能性指标

系统电磁兼容性设计应与系统功能性参数同时考虑,分析系统所处电磁环境下电磁能量对功能性参数的影响,明确兼容性设计的要求。

(1) 系统精度。系统内外干扰源产生的电磁能量耦合进系统内关键设备或关键电路,可能使系统对有用信号接收的精度降低(如导航仪精度、通信信噪比、制导精度等),应从系统精度允许降低的程度来考虑系统的电磁兼容设计。

(2) 系统安全性。含电引爆装置的武器系统环境电平超过电路敏感阈值时会引起误爆或哑弹,燃油区或加注区的环境电平超过燃点所需的电平时会引起燃料自燃,应从人员、军械、燃油、设备的安全性要求来考虑电磁兼容性设计。

(3) 系统可靠性。电磁干扰可能使系统内电气、电子敏感设备功能下降,甚至使元器件损坏,系统功能失效率增加,影响系统平均故障间隔时间,进而使系统完成规定功能的概率降低。应从可靠性要求出发,根据电磁干扰引起的故障模式来进行电磁兼容性设计。

(4) 系统界面参数。系统内外电气、机械、环境的界面参数以及各种信息传输的界面特性都与电磁兼容性相关,对关键的电路接口界面、分系统间的界面、系统与环境的界面等参数应进行电磁兼容性设计。

(5) 环境控制要求。电磁环境对发射和敏感设备或系统都是重要的,应从环境的要求对电磁发射系统进行电磁干扰控制设计,通过对各分系统、设备的合理布置或采取环境改善措施来实现电磁兼容性。

7.1.3 系统全寿命期

系统电磁兼容性设计要考虑系统的全寿命期,以系统可能遇到的最坏电磁环境电平作为系统电磁兼容性设计的基点。应立足于全寿命期获得兼容状态来选用设备,确定布局和技术控制状态,选择材料、结构和工艺。

7.1.4 使用兼容性

在进行兼容性设计时,要充分考虑系统的使用特点以及与周围系统的关系,应在频域、时域和空域上实现系统兼容。

7.1.5 电磁兼容性费效比

进行系统电磁兼容性设计时,要考虑经费的使用效果。一般在系统设计早期就考虑电磁兼容性设计,容易采取有效措施,其兼容性经费就少。要选择适当的兼容性裕度,并不是兼容状态安全裕度愈高愈好,应考虑实际的经费可能。

7.1.6 综合平衡

对系统电磁兼容性设计的程度要全面综合考虑,系统的功能性、兼容性,研制周期及使用性都与经济性有关。兼容性越好,研制周期越长,经费花消越大,因此电磁兼容与经济性、时间性要进行综合平衡。

7.2 兼容性设计的基本参数

7.2.1 电磁敏感阈值

电磁敏感阈值是系统或设备不能正常工作的干扰临界电平值,是在其工作频段内受电磁干扰最敏感的频段或频率上的干扰临界电平值,是衡量系统或设备受电磁干扰的易损性参数。电磁敏感阈值愈低,说明系统或设备愈易受干扰。

7.2.2 敏感度限值

设备或系统的电磁敏感度限值,是规定的设备或系统抗电磁干扰能力的电磁敏感电平值。敏感度限值是在电磁敏感阈值基础上制定的,敏感度限值通常小于敏感阈值,保证一定的安全裕度。

7.2.3 电磁干扰值

设备或系统在电磁环境中感受到的无用信号电平值为电磁干扰值。电磁干扰值小于设备或系统的敏感度限值,则设备或系统能正常工作;但小于敏感阈值时,不一定满足安全

裕度要求。

7.2.4 电磁发射限值

电磁发射限值是允许干扰源设备和系统在工作时给环境带来的电磁发射电平值。规定电磁发射限值是控制电磁干扰源,实现电磁环境与设备和系统兼容工作的一种措施。在规范法和标准控制法的兼容性设计中,电磁发射限值就是标准规定的干扰源不应超过的电磁发射限值。在系统电磁兼容性分析法中,电磁发射限值是具体的电子设备或系统在所处电磁环境中能正常工作时所允许的环境干扰电平限值。

7.2.5 安全裕度值

电磁兼容性安全裕度值是衡量系统和设备电磁兼容性的安全程度,即实际接收的电磁干扰量值比设备和系统敏感阈值所低的程度,其值由下式确定

$$m_{dB} = S_{dB} - I_{dB} \quad (9.4-43)$$

式中: m_{dB} 为安全裕度; S_{dB} 为设备或系统的敏感阈值; I_{dB} 为设备或系统实际接收的干扰电平值。

如果安全裕度小于零,说明设备或系统处于受干扰状态,不能在环境中兼容工作;如果安全裕度等于零,说明设备或系统处于临界工作状态;如果安全裕度大于零,说明设备或系统处于兼容工作状态。安全裕度越大,设备或系统工作越安全可靠,但安全裕度越大,电磁兼容性设计方面的费用就增加得越多。只有选择适当的安全裕度值,才能使费效比综合平衡,达到最佳的设计效果。在设计时,应根据设备和系统的重要性提出不同的安全裕度要求。

7.2.6 性能降低判据

系统或设备性能降低判据是用来评定不希望响应的依据。系统受到干扰后,最低可接受的性能指标,就是该系统性能降低的判据,各类系统或设备有不同的性能降低判据。

7.2.7 失效判据

系统和设备在受到电磁干扰后,有可能产生失效的现象,失效判据是评定系统不允许接受的电磁干扰电平。不允许的干扰信号进入系统后,会使电路或元器件产生故障,其故障可能是永久性恶化或永久性失效。

(1) 永久性恶化。系统中设备受到干扰后,由于电磁能量的作用,使元器件遭到电气损坏或结构损坏,但元器件仍然可起作用或仅暂时不起作用。干扰消失后,元器件虽然仍能工作,但已不能恢复到原有的性能,即元器件的性能已降低到指标不允许的程度。

(2) 永久性失效。系统中设备受到干扰后,由于电磁能量的作用,使元器件遭到电气损坏、结构损坏或两者兼有之,致使元器件完全失效,不能工作。如线路熔化形成开路、半导体二次击穿形成短路等。

7.3 系统电磁兼容性设计要求

系统电磁兼容性设计要求的目的是,保证系统规定的战术、技术性能的充分发挥,实现系统自兼容及与环境的兼容。

7.3.1 一般要求

7.3.1.1 设备、分系统的分类

系统中所有设备和分系统都要按耦合电磁能量对系统可能造成的危害程度进行分类。

(1) I类。在受到电磁环境引起的干扰后,该类设备或分系统工作性能的降低或破坏会影响系统和人员的安全。

(2) II类。在受到电磁环境引起的干扰后,该类设备或分系统工作性能的降低或故障使系统不能完成部分功能任务,而不影响系统和人员的安全。

(3) III类。在受到电磁环境引起的干扰后,该类设备或分系统仅出现工作性能降低,而不会发生故障;或者引起故障后,不会导致系统完不成任务。

7.3.1.2 系统电磁兼容性大纲和各种实施计划的制定

应按照电磁兼容性管理要求,编制兼容性大纲,成立电磁兼容性技术组,编制兼容性控制、试验、预测、培训等计划。

7.3.1.3 设备和分系统必须满足的相应标准要求

(1) 系统内选用的设备和分系统必须满足相应的规范和标准要求,当前电子设备和分系统的电磁发射和敏感度应满足国军标 GJB 151A—1997 和 GJB 152A—1997 的要求。电子设备和分系统的电源应满足相应的供电系统要求和船舶系统电源界面标准要求。如果电磁发射或电磁敏感度超过规范和标准的规定值,则应提出特殊的要求和补救措施。

(2) 电磁环境场中军械系统(含电爆装置)应满足国军标 GJB 786 所规定环境电平要求,如果有偏离,则应协调、提出特殊要求或对系统进行其他的补救措施。

(3) 雷达系统和通信系统应满足国军标 GJB 151A/152A—1997 规定要求,还应满足雷达系统和通信系统的电磁兼容性要求。计算机分系统除了满足 GJB 151A/152A—1997 规定要求外,还应满足国军标 GJB 511—1988、GJB 422—1988 的要求。

7.3.1.4 兼容性状态确认

系统电磁兼容性技术状态是在系统研制周期内逐步形成的,是系统技术状态的一部分,是系统达到硬件和软件功能特性与使用特性的兼容能力,对兼容性状态应同系统技术状态一样进行确认和控制。为了确保系统兼容性状态的实现,必须持续地进行跟踪管理控制。

(1) 功能基线的兼容性状态。系统方案论证阶段,研制任务书中对功能性的描述和限定,在确定功能基线时,还应阐明功能性正常或失效所适应的电磁环境以及电磁效应所确定的兼容性参数,并应在系统电磁兼容性大纲中给予确定。

(2) 分配基线的兼容性状态。在系统方案确认阶段,对各分系统和设备的功能性均已确定。应将系统电磁兼容性大纲中对系统总体电磁兼容性要求分配到系统的总体、分系统及设备中去,形成各部分技术任务书的电磁兼容性设计要求。

(3) 系统研制鉴定基线的兼容状态。在技术设计、施工设计、生产试验、鉴定等阶段,全面实施电磁干扰控制计划和试验计划所获得的系统兼容性状态。在总体、分系统及设备的技术文件和图纸中应有体现。

7.3.1.5 兼容性鉴定与验收

系统、分系统和设备的兼容性鉴定与验收一定要以试验数据作为鉴定与验收的依据。

7.3.2 系统的兼容性要求

系统电磁兼容性设计的目的是实现其兼容性。每个系统都有自己独特的要求和特性,一般应将系统总体和分系统结合起来考虑。

7.3.2.1 系统总体的兼容性要求

(1) 在各种工况下,系统的各分系统、设备应能正常工作,不降低性能指标,实现其自兼容。系统应有适应各种恶劣电磁环境的能力,能与环境实现兼容,并且工作不给系统内外的军械、燃油、设备和人员带来危害。

(2) 系统兼容性应具有一定的安全裕度,系统的兼容性要求应分解到各分系统中去,对分系统提出要求,对分系统

和关键设备的兼容性指标参数要具体规定。系统内需确保兼容性的分系统和设备,列为关键分系统和设备,并给予重点控制。

(3) 应结合系统具体情况,对通用规范和标准进行选用和剪裁,编制成适用于该系统的兼容性规范要求。对系统应进行频谱分析,确保在频率指配和使用上的兼容性。

(4) 系统内电缆和导线应按电磁兼容性分类敷设,充分利用自然条件和有效空间进行隔离,对各类电缆应有兼容性标记。系统内电源分系统应满足相应电源标准规定的要求。对各分系统,一般应采用单独供电的方法,应采用变流机组或隔离变压器进行隔离。进入各敏感舱室的电源线应进行滤波。

(5) 干扰源分系统和设备应与电磁敏感分系统和设备分区、分舱室布置,以满足隔离要求。如共舱室、共机架,则需进行兼容性分析或模拟试验。系统应具有防静电、防核电磁脉冲和防雷电的措施。对系统内的屏蔽、搭接、接地工艺应明确规定,以保证工艺质量。

7.3.2.2 分系统的兼容性要求

应对组成系统的各分系统规定兼容性规范要求,使其满足总体兼容性控制措施以及与其他分系统兼容性接口要求,对每个分系统的要求由该分系统的兼容性设计保证。

7.4 系统电磁兼容性控制设计

系统电磁兼容性控制设计的目的在于控制电磁干扰,通用规范和标准经过剪裁得出的系统兼容性规范和标准是系统电磁兼容设计的依据。

7.4.1 系统总体布局设计

系统总体应根据系统组成、技术任务书和电磁兼容性大纲的要求,以及各分系统或设备的工作特性和兼容性要求进行合理布局。

7.4.1.1 布局的原则

(1) 根据各分系统电磁发射和电磁敏感性要求进行合理布局,确保各分系统和设备能充分地发挥其性能,完成其任务。电磁发射和电磁敏感的设备或分系统应分舱或分区布置,其发与发或发与收之间要满足一定隔离度要求。一般是将发射天线布置在发射区域,接收天线布置在弱场区域,电磁发射和敏感设备则分舱布局。

(2) 尽量减少在露天强场区内布置电气、电子设备和分系统。不得不布置时,应根据电气、电子设备和分系统的电磁特性,按环境兼容的要求提出特殊控制措施。军械、燃油口、人员岗位、露天设备等布置,应确保无危害。

(3) 总体布局中,要考虑系统内各分系统之间界面的设计,确保分系统间能兼容工作。

7.4.1.2 通信天线的布置

(1) 确保通信性能良好,在工作频段范围内,水平方向性图、垂直方向性图的失真度要小,能保证全方向性通信。通信天线应布置在适当高度上,要求天线垂直方向性图具有低辐射仰角特性。减少天线之间,以及天线与其他大金属件的耦合,以防收信机频段阻塞,做到多网络收、发同时工作。

(2) 通信天线布局,应考虑与雷达系统的兼容性,其主要频率的谐波不要落在雷达工作频段内。通信天线布置,要考虑与电爆型军械系统、燃油、人员、电子战系统以及其他电子设备的兼容性,不能构成危害。

7.4.1.3 雷达系统布置

(1) 确保雷达探测、预警和跟踪的技术性能要求,在方

位和仰角范围内不被遮挡,或遮蔽效应最小。雷达工作频率错开,以减少同频干扰。雷达主波束不能照射到另一个雷达的波束里。

(2) 雷达天线布置要考虑对军械、燃油、人员、设备的辐射危害,确保其安全性。

7.4.1.4 电气、电子设备的布置

电气、电子设备和分系统应按功能和电磁特性进行合理布置。

(1) 设备尽可能布置在舱室内,电磁发射设备和分系统应与电磁敏感设备和分系统分舱布置,必须布置在露天辐射场区内的设备,应采取防护措施。雷达微波发射设备应和敏感设备分舱布置。如需同舱室布置时,应在装置前进行预测分析或模拟试验,以便采取适当措施进行隔离。

(2) 同一分系统的设备应相对集中,发射设备和接收设备尽可能靠近各自的天线,以减少天线馈线的损耗。分系统内的敏感设备应远离供电设备,如变流机组、大功率电力电子设备等。有阴极射线管的设备,其布置区的磁场场强应不大于 $30 \mu\text{T}$ 。

(3) 高敏感设备舱室,如接收机室、译电室和作战指挥室等应设在弱场区,宜采用内通道开门或套间。如果环境电平比较高,宜采用屏蔽室结构形式,门、窗、通风口和电缆进出口均按屏蔽要求进行设计。

(4) 有数字信息接口的设备之间应设置接地系统。计算机、微机、数字信息传输设备布置的范围应尽量小,以减少接地系统的敷设量。

7.4.1.5 其他设备和系统的布置

系统中燃油舱、加注孔、燃油库的布置应按有关标准要求的场强进行布置,一般应布置在发射天线的弱场区,不得布置在强场区。系统馈线、电缆的选择和敷设也应符合相关要求,武备系统的布置应根据国军标 GJB 786—1989 中规定的军械系统对射频场强的要求进行配置。

7.4.2 减少散射干扰的设计措施

系统电磁环境主要由主动源形成,但被动源(二次发射源)的影响亦不容忽视。如果考虑不周,在某些区域会形成很强的场强,往往是人们意想不到的。减少散射的设计,是改善电磁环境的重要措施之一。

7.4.2.1 减少非线性效应的措施

(1) 尽量避免在系统区域内堆放或使用铁磁材料,如使用铁磁材料,则应避免尖锐边缘、孔洞和网眼等。系统内的所有金属部件连接,宜采用良好的焊接结构,尽量减少螺接、铆接或不良焊接,避免螺接和铆接的混杂。

(2) 采用的索具及构件在可能的情况下尽量采用非金属材料代替。天线座及其部件不宜采用铁磁材料,尽量减少接头,在接头处应搭接。尽量消除活动接点,减少伸缩接头;如不能消除,应采用跨接线以消除影响。所有连接应按工艺要求处理,安装前应除锈,清理表面,直见金属本体,涂导电胶,并用防腐剂封装。

(3) 升降装置、悬吊门和其他有关设施,最好由高导电材料制造,并减少活动连接。设施的舱口、门、窗等开口应尽量少设,能内部设通道的不要在外开口。门、窗等的盖均应采用跨接条。

(4) 影响互调产物的主要因素是金属物的形状、平滑度、孔洞数量与边缘锐度、表面清洁度、电流分布、磁导率以及发射功率、频率等,设计时应很好考虑这些因素。为防止武备系统部件产生锈蚀螺栓效应,应采用玻璃钢增强塑料封装。

7.4.2.2 减少散射金属物件

处于系统内强场区域的金属构件,会对强场产生再辐射,如果接触、搭接不良,势必产生干扰频谱,导致通信、雷达性能下降。大量金属构件的反射,可能会形成雷达的假目标,影响探测、跟踪精度。为了改善电磁环境,要最大限度地减少辐射场中的金属构件数目,尽量用非金属材料代替索具、栏杆、扶手、拉杆和不需要屏蔽作用的建筑物。

7.4.2.3 吸波涂料的使用

电磁环境是主动辐射源和二次辐射源综合的结果,减少大功率辐射源周围金属构件的散射和反射,可在受影响金属构件上贴吸波材料或在场源周围涂覆吸波材料。

(1) 复合型微波吸收体,采用高性能铁氧体吸收剂制成。吸收效率高、频带宽、可靠性高、使用方便,可按吸收电磁波的场所特点制成薄板形、柔软型、管形、环形等各类形状。

(2) 复合型吸波涂覆材料亦是采用高吸波性能的铁氧体材料复合制成,可涂覆于需要改善环境的任何场所,大量用于各种装置和通信设施的隐身和屏蔽。

7.4.3 系统兼容性接口设计

对复杂的系统,若能抓好系统的兼容性接口设计,往往可以消除许多不兼容问题。若接口兼容性设计不好,将会带来许多不兼容的隐患。系统级的电磁兼容设计应十分重视兼容性接口设计,一般包括系统与环境,分系统之间,各分系统与总体,信号输入与输出,干扰源与敏感设备的隔离,射频辐射危害防护,设备搭接和接地,设备与总体的接地系统,电缆的选择、分类、敷设和走向,滤波选用与安装,天线的选用、布置和安装,设备选型、布置和安装,结构、构件、拉索、门、窗和孔的接口设计,电源类型和性能等多方面的要求。

7.4.4 防雷电、防静电、防核电磁脉冲的设计

防雷电、防静电、防核电磁脉冲的设计,对不同用途的系统是不同的,如飞机、导弹系统就特别关心防雷电、静电,应根据相关要求进行合理设计。

7.4.5 分系统和设备的电磁兼容性设计

根据系统电磁兼容性要求、电磁环境的电平和兼容性接口要求,分别对组成系统的各分系统电磁兼容设计提出相应的要求,并在相应分系统的技术规格书体现,从而把总体兼容性控制分解、综合到各分系统中。

7.4.5.1 控制干扰源分系统和设备

对系统内功能性干扰源,如无线电和雷达发射机,要限制无意发射;对非功能干扰源,如开关、转换器、电力电子设备等要限制发射频谱能量。

(1) 功率和带宽要给予限制,功率不能太大,满足信号传递要求即可。带宽能容纳有用信号所需的最小带宽即可,信号幅度限制到能满足信息传输所需。

(2) 脉冲形状应尽可能采用慢的上升时间,并具有最小的幅度。脉冲应当在其所需要的地方产生,不应通过长线传输。

(3) 有方向性的天线,要减小副瓣增益,提高频率稳定性。对宽带电磁发射设备应适当地安装外罩,对其引线要适当屏蔽或去耦,或者既屏蔽又去耦,以减少泄漏电平。

7.4.5.2 控制接收分系统和设备

对系统内接收设备的控制也很重要。

(1) 接收带宽限制到获取信息所需的最小值。根据分系统所处环境电平,对频带外的信号进行衰减,不仅考虑接收回路的带外信号,还要考虑互连线、电源线上的干扰信号。

(2) 对镜像干扰、中频干扰和寄生干扰等要抑制, 对接收设备的动态范围要适当考虑, 确保信号不工作在非线性区域。

7.4.6 敏感设备和分系统抗辐射干扰设计

7.4.6.1 设计程序

敏感设备和分系统所处的电磁环境和性能指标是系统管理人员根据系统的使命要求提供的, 是对分系统或设备的预定电磁环境和性能要求作的一些规定。

(1) 如果电磁环境电平耦合到设备和分系统的电磁能量与电磁敏感度相比, 电磁敏感性小于 30dB 时, 不需要附加额外措施, 因为一般机壳或组件封装壳都具有 30dB 隔离能力。

(2) 如果电磁环境电平耦合到设备或分系统的电磁能量与电磁敏感度相比, 电磁敏感性大于 30dB, 但小于 70dB, 可采用附加措施(如滤波、屏蔽、设备加固、网络加固、功能加固等)或者采用回避处理方法(如改变安装位置等)。

(3) 如果电磁环境电平耦合到设备或分系统的电磁能量与电磁敏感度相比, 电磁敏感性大于 70dB, 或经过加固处理后的试样或模型在该电磁环境下还有易损性, 超过加固设计的能力。这就要重新设计, 修改原来规定的电磁环境参数或设备和分系统的功能性指标。

7.4.6.2 抗干扰途径

(1) 抗扰要求。根据分系统功能性要求所处的地位提出安全裕度要求, 作为敏感设备、系统的抗扰设计要求, 一般按分系统和设备的类别进行。I 类影响系统安全的设备或分系统, 一般为含电爆装置的分系统和设备, 其安全裕度规定为 20dB。II 类影响系统使其不能完成部分功能的设备或分系统, 一般为雷达、通信、导航和作战指挥等分系统, 其安全裕度规定为 6dB。III 类影响系统的局部性能, 但不会导致系统完不成任务的设备和分系统, 一般为保障、生活等设备和分系统, 其安全裕度规定为 3dB。

(2) 抗扰方法。敏感系统设计时, 按电磁能量传播的耦合途径分层次采取隔离措施, 一般按系统级、分系统级、设备级、组件级、电路级和元件级等, 其每层能抗扰的程度由系统电磁兼容性设计综合分析, 各级中有不同的抗扰技术措施。

7.4.7 设计中考虑使用兼容性

系统电磁兼容性设计的目的, 在于实现使用兼容性。在电磁兼容性设计时, 综合考虑使用中的兼容性, 才能获得较好的费效比。除了对电磁干扰进行硬件的抗干扰设计外, 还应考虑其他抗干扰措施。

7.4.7.1 功能性的逻辑设计

(1) 对某些重要的、一次性使用的武备系统, 如导弹系统、干扰火箭、运载工具等, 通过编码/时间鉴别来确保不受意外瞬变电磁能量的干扰, 避免电点火装置意外引爆。对这种系统的设计, 通过逻辑设计来判断是干扰信号还是有用信号。

(2) 时间鉴别。系统的信号必须有一定的持续时间, 此时间要比电磁环境引起的干扰持续时间长。

(3) 均衡技术。要求一个有用信号同时出现在不同的线路上, 这一方法可对随机瞬变现象进行有效的鉴别。

7.4.7.2 回避处理

回避处理是当辐射或传导干扰可能引起系统功能失效时, 立即中断信号的处理方法。对瞬变干扰引起敏感设备功能失效的回避方法是: 如果检测到射频场的强度足以引起逻辑变化、功能失效时, 就闭锁所有输入信号端, 将操作程序

返回到最近一个安全基准点进行回避, 延迟一个指定时间之后再复原到需要的位置, 并修正已过去的时间而重新开始工作。

7.4.7.3 同步与匿隐

当系统中有两部雷达工作在同一频段内, 但要求它们彼此独立工作、互不影响时, 可采用同步或匿隐的方法。两部雷达同步, 在设计时要选用不同频率的石英作为同步装置, 并统一触发系统, 确保两部雷达的同步运行, 这是消除同频干扰的有效措施。匿隐方法是使两部雷达不受干扰的最简单方法, 即一部雷达发射探测脉冲时, 从该雷达的前置调幅器取出一个负脉冲加在另一部雷达的定时自动增益控制脉冲上, 关闭另一部雷达的接收机, 保护该雷达接收机不受干扰。

7.4.7.4 空域控制

对于带有天线的分系统, 要分析其天线型式、天线数量、工作频段、波束宽度、扫描或跟踪速度和天线的俯仰角范围(使用的空域范围), 为使系统内各分系统在空域范围内合理分配, 要绘制一个空域覆盖分布图, 提出空域使用细则或空域闭锁准则。

(1) 多部雷达天线同时工作的波束应在空域内错开, 其错开的最小间距应使耦合电平小于接收机的灵敏度电平。各雷达间与干扰门限值有关的最小间距、高低间隔角等一定要满足兼容性的要求。频率相同或频率邻近的雷达, 应使它们在不同方位上同步。

(2) 雷达工作时, 可能在其某方位或高低角范围内, 不允许出现强功率照射(如燃油加注、导弹发射和直升机甲板等部位), 这时可采用机械限制和电气限制的方法, 使雷达的仰角范围或方位角受限, 仅在规定范围内照射。

7.4.7.5 频域控制

频域控制的目的是使有用频率得到保护, 无用频率得到抑制。系统在频率分配基础上要有一个功能使用图(系统频率使用细则)。

(1) 应制定频率使用细则, 确定频率共用的原则和状态。系统内频率使用细则, 应考虑系统所处环境的频谱使用时间和状态的变化, 不同时间和地理区域使用不同的最佳工作频率。系统内各分系统或设备所占用带宽的限制, 应经系统部门允许才能变动。

(2) 系统中的大功率发射分系统, 对于其影响面大的频率发射功率要加以限制。应防止系统内各分系统工作在非线性工作状态, 否则将导致干扰频率的产生。

7.4.7.6 时域控制

时域也是电磁兼容性设计的内容, 应对系统内时间共用的分系统和设备的工作频率、工作电平、工作制式、位置隔离等进行分析。

(1) 同时工作的设备或分系统, 频率应错开, 同时还应考虑谐波的影响。

(2) 同时工作的设备或分系统, 功率应给予限制, 不能因功率大而带来干扰。

(3) 需要同时工作、功率又不能限制的设备或分系统, 则在配置位置上进行调整, 以协调解决。

7.4.7.7 功率限制

功率限制是在空域、频域和时域限制基础上的功率限制, 亦可编制一个功率使用表, 明确功率与空域、频域、时域的关系。

7.5 系统兼容性设计的保证

为了使系统兼容性设计成功, 应在设计过程中给予质量

上的保证,并进行兼容性状态的跟踪控制。系统功能性指标确认的兼容性设计要求确定之后,对所确立的兼容性技术状态要进行跟踪管理,确保系统兼容性的实现。

7.5.1 跟踪控制

对系统功能性指标和兼容性要求的更改,应严格控制。对更改的项目,需要进行满足系统兼容性要求的验证试验。对更改措施的效果进行分析,确保兼容性分析和更改措施的有效性。对于电磁兼容性十分复杂的更改,必须慎重处理,进行全面评价。

7.5.2 兼容性试验

在系统电磁兼容性设计的全过程,需伴随进行许多试验,以便确立、验证、评价系统兼容性的有效性。

(1) 模型试验。根据系统的简化模型,按一定的比例要求进行模型试验。一般有天线布置模拟试验、电磁危害模型试验、分系统间相互干扰模拟试验、安全裕度模拟试验和控制措施模拟试验等。

(2) 功能性试验。系统的功能性试验,一般用单个分系统来模拟,以便确定系统在规定的环境条件下,能否满意工作,并得出性能指标的变化情况。

(3) 验证试验。系统的验证试验,是为了检验系统在规定的规范和标准下能否正常工作,并寻找关键的环境界面可能造成的系统故障及其原因。

(4) 评价试验。系统、分系统在交货前均要进行兼容性评价试验,鉴定系统、分系统的兼容性设计是否满足有关标准、规范及技术规格书的要求,一般包括分系统和设备考核试验、电磁环境试验、各分系统间的相互干扰试验以及关键分系统和设备的安全裕度试验等。

7.5.3 技术文件

系统的电磁兼容性要求,一定要在系统功能性技术文件中体现。系统的技术任务规格书和各分系统的技术要求中,对兼容性要求应有明确规定。在系统功能性设计阶段的结合部,兼容性设计技术文件应随同功能性文件一起进行评审。



参考文献

- [1] 蔡仁钢. 电磁兼容原理、设计和预测技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.
- [2] 白同云. 电磁干扰与兼容. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.
- [3] 白同云, 吕晓德. 电磁兼容设计. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [4] 湖北省电磁兼容学会. 电磁兼容原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [5] 高攸纲. 电磁兼容总论. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [6] 郭银景, 吕文红. 电磁兼容原理及应用. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] 林国荣. 电磁干扰及控制. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [8] 马伟明. 电力电子系统中的电磁兼容. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [9] 陈穷, 蒋全兴, 周开基, 王素英. 电磁兼容性工程设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [10] 翁瑞琪. 袖珍电子工程师手册. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [11] 林渭勋. 现代电力电子电路. 浙江: 浙江大学出版社, 2002.
- [12] 赵良炳. 现代电力电子技术基础. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [13] 赵可斌, 陈国雄. 电力电子变流技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1993.
- [14] 王聪, 赵金. 现代电力电子学与交流传动. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] 陈坚. 电力电子学(电力电子变换和控制技术). 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [16] 王兆安, 张明勋. 电力电子设备设计及应用手册. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [17] 王英剑, 常敏慧. 新型开关电源实用技术. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [18] 区健昌, 林守霖. 电子设备的电磁兼容性设计. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [19] 郭银景, 吕文红. 电磁兼容原理及应用. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [20] 吕仁清, 蒋全兴. 电磁兼容性结构设计. 南京: 东南大学出版社, 1990.



第10篇 船舶电气工艺

主编单位：上海江南造船(集团)有限公司

主 编：陶钧成 黄宣平 盛培业

编写人员：陶钧成(上海江南造船(集团)有限公司)

黄宣平(上海江南造船(集团)有限公司)

盛培业(上海江南造船(集团)有限公司)



第1章 船舶电气设备安装工艺

1 概述

1.1 主题

1.1.1 船舶电气设备安装的环境条件

(1) 船舶因其航行区域广阔, 遭遇的气象条件复杂, 气温、湿度变化大。环境温度因航区不同、所处部位不同, 可能在一25℃~45℃的范围内变化, 有时甚至更恶劣。空气中还常带有盐雾、油雾、霉菌等腐蚀物, 某些区域还存在爆炸性气体。

(2) 船舶受大风、波浪的作用, 会产生倾斜和摇摆, 电气设备要经受22.5°以内的横倾和横摇、10°以内的纵倾和纵摇, 甚至更为严重的倾斜和摇摆。

(3) 船舶正常营运中, 还会产生振动和冲击。作战舰艇在发射武器和受到攻击时, 产生的振动和冲击会更大。

(4) 电气设备在运行时, 相互之间会产生各种电磁干扰, 影响其正常运行。

1.1.2 船舶电气设备的安装原则

(1) 安全可靠: 设备固定要牢固, 安装方式要与所处场所相适应, 尤其是露天场所、危险区域和电子设备集中的区域。

(2) 分布合理: 要便于操作、使用和维护、修理。

(3) 经济实用: 在保证安装牢固的前提下, 设备安装支架应尽可能轻便、便于安装, 并尽可能采用标准化的设计, 有利于生产管理, 缩短安装周期。

(4) 整齐美观: 尽可能为船员营造和谐的工作和生活环境。

1.2 说明

现今世界造船业的发展方向是以统筹优化为指导, 应用成组技术原理, 以中间产品为导向, 按区域组织生产, 壳舾涂作业在空间上分道, 时间上有序, 实现设计、生产、管理一体化, 均衡连续地总管造船的现代化造船模式。

我国的造船企业也在向这一方向进行造船模式的转换。总体上来说, 与世界上先进的造船企业还有不小的差距。各企业转模的速度和深度也不一样。可以说, 我国的大部分造船企业还处于转模的过程中。

目前, 各造船企业大部分都有自己的企业标准或企业规范来指导生产。这些标准或规范虽然有所不同, 但大体上反映了各船级社的基本要求, 能适应目前的造船工程的需要。

2 船舶电气设备安装的基本工艺要求

(1) 电气设备安装应考虑安全和便于检修, 并应整齐无歪斜。

(2) 电气设备连接和紧固用的螺钉和螺母, 均应有防止其受振动而松脱的措施。

(3) 电气设备不应贴近油舱、油柜或双层底储油舱等外壁表面安装。如必须安装时, 则电气设备与此类舱壁之间, 至少应有50mm的距离, 底脚并应安装加强复板。

(4) 调节电阻、起动电阻、充电电阻、电热器具以及其他在工作时能产生高温的电气设备, 在安装时应有防止导致附近物体过热和起火的措施, 并严禁在油舱、油柜或双层底储油舱等外壁表面安装。

(5) 在机器处所内花钢板以下、封闭的燃油和润滑油分离机室内, 不准安装插座。

(6) 当电气设备的外壳温度超过80℃时, 应加防护措施或在布置上予以安排, 以防止工作人员偶然触及而灼伤。

(7) 在水密的舱壁、甲板、甲板室的外围壁上, 不应钻孔以螺钉紧固电气设备。

(8) 电气设备不应直接安装在主甲板以下的船体外板上。

(9) 电气设备应离开磁罗经适当的距离, 或者对这些设备加以屏蔽, 以使其外部干扰磁场能减至最低限度。

(10) 在可能出现爆炸性气体、蒸汽而有爆炸危险的处所安装的电气设备, 应符合相应的防爆要求并具有船级社认可的防爆合格证。

(11) 工作电压超过50V的电气设备的带电部件以外的所有可接近的金属部分一般均应接地。

(12) 当非铝合金设备支架安装在铝质轻围壁上时, 中间应用绝缘衬垫(例如橡胶布、涂有白漆的帆布等)隔开, 以防直接接触, 引起电解腐蚀。铝合金设备装在钢质构件上也应同样处理。

(13) 安装场所如有剧烈震动, 足以影响设备正常工作时, 设备安装时应设有减震器。

(14) 舱壁或顶部的封闭板内一般不应安装电气设备, 但线路的分支接线盒(箱)可安装在便于开启的封闭板内, 并有明显的开启标志。

(15) 对有特殊安装要求的设备, 按专用工艺执行。

3 各类电气设备安装的附加工艺要求

3.1 电机

(1) 发电机组的安装, 其转轴应与船舶艏艉线平行, 其他卧式电机的轴线也应尽量与艏艉线平行。但对于停泊用或低速推进下工作的电机可例外, 如起货机、锚机、绞缆机、救生艇吊艇机的电动机等。

(2) 立式电机的转轴应与船舶水线平面垂直。

(3) 电机的安装部位应留有电缆引入、接线、测量、维修的空间。

(4) 电机的传动部分, 必须装有可拆的护罩, 以防触及。

(5) 电机安装时, 其轴与被拖机械的轴中心线要一致。

(6) 电机安装必须牢固, 机体与底座应有良好的电气连接。

3.2 主配电板和应急配电板

(1) 配电板的前后应留有足够宽度的通道, 其前面通道的宽度应至少为0.8m, 后面通道的宽度应至少为0.6m。若

配电板的结构型式可在前面和侧面进行维护检查和更换部件时,则允许不设后通道。

(2) 配电板的后面和上方不应设有水、油及蒸汽管、油柜以及其他液体容器。若不能避免时,则应有可靠的防护措施。

(3) 除安装在机器控制室中的主配电板外,均应在其后通道的入口处配置带锁的门。当主配电板长度超过 4m(海船)或 2.5m(内河船)时,主配电板后通道的两端均应设门。

(4) 主配电板的前后均应铺有防滑和耐油的绝缘地毯或经绝缘处理的木格栅。

(5) 配电板应安装在公共底座上。底座的不平整度每米不大于 1mm,全长允许极限不大于 6mm。

(6) 配电板长度较长,需要分解后吊装的,拼装时应保证汇流排连接螺钉能自由插入连接孔,而不受剪切力的作用而产生不良影响。

3.3 控制设备及分配电设备

(1) 起动箱及分配电箱的安装高度,其下沿离甲板或花钢板一般为 1200mm 左右,相邻安装的设备,其箱体下沿应尽量对齐。外形尺寸较大的起动箱及分配电箱,其安装高度应为上沿离甲板或花钢板 1800mm,以方便操作与检修。

(2) 电机的起动箱、主令控制器或控制按钮盒,应尽量安装在电机附近,以便操作、观察和检修。

(3) 控制设备的操纵手轮或手柄,沿顺时针方向旋转时应为“电动机的转速增加”、“上升”、“起锚”、“收缆”,反之则为“电动机的转速减少”、“下降”、“抛锚”、“放缆”等。控制设备的操纵手轮或手柄向前移动时,应为“抛锚”、“放缆”、“下降”,反之为“起锚”、“收缆”、“上升”等。

(4) 主令控制器或操纵台(器)的安装,应考虑其手柄操作的方便,手柄转轴至操作平台的高度一般为 1m 左右。立式安装的主令控制器或操纵台(器),其底部应设有基座。在室内甲板安装时,一般配置木垫,并在木垫和基座之间用涂有厚白漆的帆布封闭。在露天甲板安装时,应设有金属底座,其高度不应低于 100mm,并应在设备与底座之间垫以厚度不小于 5mm 的四周无开口的橡皮,以保证水密。

(5) 控制按钮盒和应急切断按钮盒的安装高度一般为设备中心距操作平台 1400mm 左右。

(6) 柴油机的起动电路的布置,应使其连接电缆尽可能短。

3.4 照明灯具和附属

(1) 舱室照明灯具的位置要合理布置,首先保证操作及工作场所的必要照明,也要考虑舱室各处的照度。具有两个分路供电的舱室照明灯具,应交叉或间隔布置。

(2) 在扶梯附近、走道的出口处、重要的工作机械处,应布置应急照明。应急照明灯具应有红色标记。

(3) 为了在夜间航行时实行灯光管制,在能向外透露光线的门上,应安装门开关。为使门开关动作灵敏,门开关一般装在门把手上方的门角处。

(4) 安装在易受机械损伤处的灯具应有坚固的保护栅。

(5) 非防水插座的安装位置应避免设在窗口下方。防水插座的插口不应向上安装。

(6) 不同电源种类及电压等级的插座,应采用不同结构的插座,并应有标明电源种类及电压等级的标记。

(7) 煤轮的货舱、油漆间、蓄电池室、消防设备控制

站、行李舱、冷藏舱、粮食舱及其他类似舱室的照明开关不应设在室内。行李舱、邮件舱、粮食舱、冷藏舱的开关应装有照明指示灯。

(8) 暗式照明开关的安装,其扳柄方向应一致。扳柄向上为“接通”,扳柄向下为“断开”。

(9) 居住区的照明设备安装高度,一般应按表 10.1-1 的规定。

表 10.1-1 居住区照明设备安装高度 mm

序号	设备名称	安装尺寸	设定面	附注
1	开关	1400	地	设备中心
2	开关插座	1400	地	设备中心
3	落地插座	300	地	设备中心
4	写字台上部插座	150	台面	设备中心
5	床头灯(高度)	750	床铺板	设备中心
6	床头灯 (横向间距)	400(横方向安装) 200(床头安装)	床头板 床旁板	设备中心
7	壁灯	1800 200	地 顶	灯下沿 灯上沿
8	镜灯	20~100	镜面箱上沿	灯下沿

(10) 装于居住区以外(机舱、机械区域、其他)区域的照明设备安装高度,一般按表 10.1-2 的规定。

表 10.1-2 居住区以外区域照明设备安装高度 mm

序号	设备名称	安装尺寸	设定面	附注
1	开关或开关插座	1400	地	设备中心
2	外通道灯	150~200 2200~2400	甲板下地	设备中心
3	舱顶灯(荧光 灯或白炽灯)	2000~2500	地	灯下沿

3.5 强光灯、探照灯及航行信号灯

(1) 强光灯、探照灯的安装应设有专用灯架或底座,应保证其操纵灵活,且光线不受阻碍。

(2) 气体放电型强光灯的高压触发装置,应安装在带有“高压危险”标志的金属箱内。金属箱应尽量安装在人员不易触及的地方。

(3) 探照灯底部与底座之间应垫以衬垫以保证水密;对于室内用连杆操纵的探照灯,其连杆的安装也应保证水密并操纵灵活。

(4) 航行灯和信号灯的灯罩颜色、安装位置、高度等,应符合有关信号设备规范的规定。

(5) 信号灯电键的安装位置,应设在驾驶部位的前沿,其安装高度应便于操纵,一般为距甲板 1m 左右。

3.6 生活电器

(1) 壁扇和顶扇的安装位置,应保证在转动时不受阻碍,且不影响人身安全。壁扇的安装高度一般为距地面 1.8m,顶扇的安装高度一般为其转动时的最低点距地面不小于 1.9m。

(2) 电取暖器必须固定安装。安装场所不应有可燃气体

及尘埃积聚。电暖器如安装在可燃材料附近时,应离开适当的距离。

3.7 船内通信、信号设备

(1) 音响及灯光信号设备应安装在有关人员易于听到和观察之处,并有必要的识别标志。电铃的安装,不应使铃罩朝上,以免水及尘埃积聚。

(2) 主机转速表、舵角指示器等单独安装的指示仪表,应便于观察。

(3) 主机传令钟的安装,应考虑操纵手柄的倒顺车方向:对驾驶部位,应与航行方向一致;对机舱,则应尽量与主机操纵手柄方向一致。如主机有两台或两台以上,则传令钟的排列应与主机排列相对应。

(4) 室外的指挥电话、扩音遥控站或有线对讲分机,一般应安装在防水式的金属箱内。

(5) 火警按钮盒的击锤应设在按钮的右侧。

(6) 通信、信号设备的安装高度,一般应按表 10.1-3 的规定。

表 10.1-3 通信、信号设备的安装高度 mm

序号	设备名称	安装高度	设定面	附注
1	铃及蜂鸣器	1800 200~300	地 顶	设备中心
2	扬声器	1900	地	设备中心
3	壁式电话	1400	地	设备中心
4	转速表、分罗经、钟等	1800	地	设备中心
5	延伸报警板	1500~1700	地	设备中心
6	火警按钮盒、信号按钮盒	1400	地	设备中心
7	通信用插座、台式电话接线盒	150	台面	设备中心

4 电气设备安装阶段

4.1 大型设备安装阶段

4.1.1 大型设备的安装方式与特点

大型设备的体积比较大,如主配电板、应急配电板、大型设备的控制板、集控室控制台、驾驶室控制台、压载控制台等,一般采用落地安装方式。而且,由于体积大,一般在船体结构全部安装结束后,就不能吊装或吊装非常困难。目前,大型设备大部分是作为封舱件,在相关船体分段合拢前,就吊装到位或基本到位,待分段焊装结束后就位安装。也有采用在船体结构上开工艺孔的方法,进行设备的吊装。

作为封舱件进行安装的设备,必须做好设备的保护工作。因为设备进舱后,还要进行船体分段的吊装焊接作业、打磨涂装作业、舾装作业等,环境比较差,时间比较长,设备容易受到明火作业的影响和受到机械损伤,因此,要特别注意对设备的保护。

采用开工艺孔进行设备吊装的方法,可以推迟设备进舱时间,设备进舱后的环境较好,设备受损伤的几率降低。但设备吊装的难度增加,可能要配置一些特殊的工装。设备进舱后还要进行工艺孔的恢复,进行局部的明火作业和涂装作

业、舾装作业,也要注意对设备的保护。此方法在修船工程中应用得更多一些。

4.1.2 大型设备安装阶段的安排

既然大型设备大部分采用封舱件的形式进行吊装,就有必要在船舶开始上船台(或在坞内建造)之前,清理出需要作为封舱件安装的设备清单,该设备清单应详细列出所有封舱件的名称、数量、质量、安装区域。

封舱件清单一般由设计部门整理发行,以便生产管理部门根据船体建造进度编制设备吊装计划,物资部门根据生产进度控制设备到货日期。

同时,大型设备的安装基座的设计、制造、安装也要与之相适应。

4.2 普通舱室设备安装阶段

普通舱室,是指不敷设热绝缘层的钢质(或轻质、铝合金)舱室,如机舱、舵机舱、其他机械舱室及空舱等。这些场所的电气设备一般在船台安装阶段进行安装。只要船体安装工作及涂装工作结束,电缆敷设到位,就可以进行设备的安装工作。

如果生产设计搞得比较好,部分设备也可以在船体分段(或总段)的预舾装阶段进行安装。这样可以缩短船台安装周期。

上船安装的设备,都应该采取适当的防护措施,以防止设备受到损伤,保持其完好。越是生产设计做得不够深入的场合,越应该重视设备的防护工作,因为在这种情况下,生产环境相对较差,设备受损伤的可能性也越大。

电气设备安装所需要的支架,应该预先在船体结构上焊装好,并完成涂装。生产设计做得比较深入的,这些支架应在船体结构制造阶段就进行焊装工作,有的船厂在船体分段(或总段)预舾装阶段进行焊装。生产设计比较落后的,则可能贯穿于整个船台安装阶段,甚至延续的时间更长。很显然,生产设计做得越深入,后期的工作环境就越好,越有利于设备的保护,越不会对其他工作产生不良影响,生产进度也越能得到保证。

4.3 有热绝缘及封闭板的舱室设备安装阶段

(1) 在热绝缘敷设之前,将需要焊装的设备安装支架按设备布置图及相关工艺要求在舱壁或其他船体结构上进行焊装工作。

当设备质量小于 1kg 时,可用木螺钉或自攻螺钉直接固定在木质装饰板或金属封闭板上;当设备质量为 1~5kg 时,应在装饰板或封闭板壁内加木挡或型材框架,使设备能固定在加强的框架上;当设备的质量大于 5kg 时,应在装饰板或封闭板壁内焊装设备安装支架,此支架上的设备安装孔应为带螺纹的,并拧上螺钉,以便安装封闭板或装饰板时能留出螺孔,便于设备安装。

(2) 当舱室热绝缘敷设完毕,电缆敷设、管路敷设完毕并安装好装饰板或封闭板后,可以进行设备的安装工作。

4.4 专用工作舱室设备安装阶段

此类舱室一般都有热绝缘及封闭装饰板,因此其安装阶段可参照本章第 4.3 节。但这些舱室的特点是电气设备比较集中,因此在安装时,要考虑安装的先后顺序,使先装的设备尽可能不影响后装设备的施工;有的设备安装在工作台下部,在不影响工作台安装的前提下,可考虑先安装好,以改善施工条件。另外,有些专用舱室有特殊的接地要求,在敷

设热绝缘之前, 安装设备支架的同时, 也要将有关接地设施焊装好, 并在安装封闭板时将其引出。

5 电气设备安装方法

5.1 安装前的准备工作

5.1.1 设备的配套

(1) 设备的配套工作由集配中心或电气配套组等机构进行。一般大型设备在进厂验收后直接吊运上船, 不进配套仓库。其他设备在进厂验收后, 由集配中心或电气配套组领出, 进行必要的整理, 发放给施工人员上船安装。

(2) 设备进厂后应进行以下各项检查:

- 1) 设备的型号、规格、数量是否与订货清单相符。
- 2) 设备是否有合格证书。
- 3) 设备的零部件是否完整、良好。精密、贵重设备的铅封或漆封是否完好。
- 4) 设备的铭牌、标志是否正确清晰。
- 5) 设备的专用钥匙、专用工具、备品备件是否完备。
- 6) 必要时应测量设备的绝缘电阻。

以上项目有问题的, 应由物资采购部门与制造厂商联系解决后, 才能验收, 上船安装。

(3) 配套部门将验收合格的设备领出后, 按照托盘表, 按区域化生产的要求, 将其分类存放, 并配齐安装附件(紧固件、接地材料、减震器、接线用器材等)。有需要做特殊标志的(如应急照明、不同电压色标等), 应在配套时做好, 以减少外场工作量。

(4) 对于航行灯、强光灯、电风扇、可携照明灯等电气设备, 应在配套时连接好外接电缆及插头。

(5) 做好收、发台账及统计, 有缺件及时反馈, 以便尽早处理。

5.1.2 设备安装支架的准备与焊装

(1) 设备安装支架由设计部门根据设备有关尺寸数据及安装方式画出制造图。设备安装支架应尽可能采用标准化设计。有的设备, 如照明灯具、开关、接线盒、插座等具有通用性且使用量比较大, 其安装支架可以考虑采用常备材料的管理方法, 保持适当的库存量, 对生产管理是有利的。

(2) 设备安装支架应在船体分段制造阶段之前制造, 以便在船体分段制造期间进行设备安装支架的焊装工作。

(3) 少量安装支架需在船体总段或船体合拢后焊装。

(4) 设备安装支架应在船体火工校正后进行焊装。焊接应牢固, 要保证设备安装平面不变形。如果安装支架不是一体的, 需要用样板固定后进行焊接, 以保证支架安装尺寸和安装平面的正确。

(5) 设备安装支架应有表面防锈措施。

5.1.3 上船安装的条件

除了封舱件之外, 其他的电气设备应在电缆敷设到位、舱室里的管路和其他设备基本安装好之后进行安装。这样既可以使电气设备的接线工作延续下去, 也可以尽量减少其他工种施工时损坏电气设备。

有封闭板的舱室, 应在封闭板安装后进行电气设备的安装工作。

一般应在一个舱室或一个区域具备电气设备安装条件后, 将这一舱室或区域的设备集中吊运上船安装。在吊运时容易被损坏的设备元器件, 可以先行拆卸, 并作好标记, 在设备装妥后再装复。

5.2 在舱壁上安装

5.2.1 普通舱壁

(1) 对接紧固, 见图 10.1-1。

(2) 螺母焊接紧固, 见图 10.1-2。

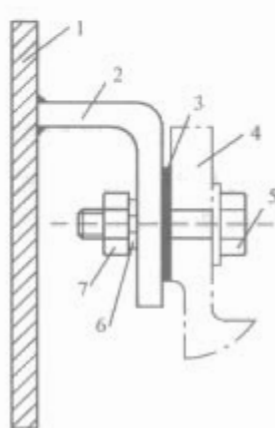


图 10.1-1 对接紧固
1—舱壁; 2—支架; 3—锡箔
垫片; 4—设备; 5—螺栓;
6—弹簧垫圈; 7—螺母

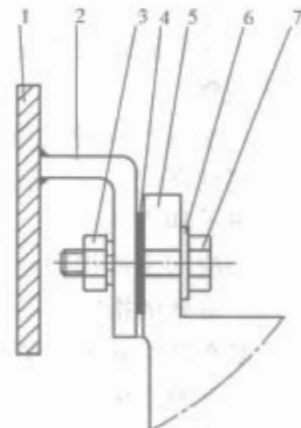


图 10.1-2 螺母焊接紧固
1—舱壁; 2—支架; 3—螺母;
4—锡箔; 5—设备;
6—平垫圈; 7—螺栓

(3) 螺栓紧固, 见图 10.1-3。

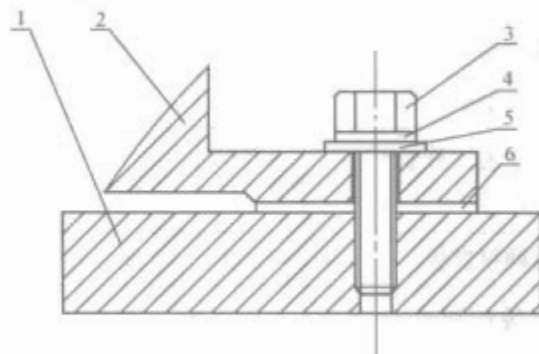


图 10.1-3 螺栓紧固
1—设备或基座; 2—电气设备; 3—螺栓; 4—弹簧
垫圈; 5—平垫圈; 6—锡箔垫圈

5.2.2 具有封闭板或装饰板的舱壁

(1) 用木螺钉直接紧固在木质围板上, 见图 10.1-4。

(2) 用螺栓直接紧固在木质围板上, 见图 10.1-5。

(3) 用自攻螺钉直接紧固在复合岩棉板上, 见图 10.1-6。

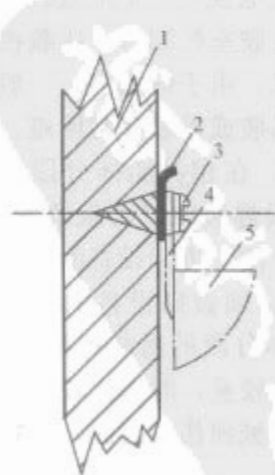


图 10.1-4 用木螺钉直接紧固在木质围板上
1—木壁; 2—接地片; 3—木螺钉; 4—锡箔; 5—设备

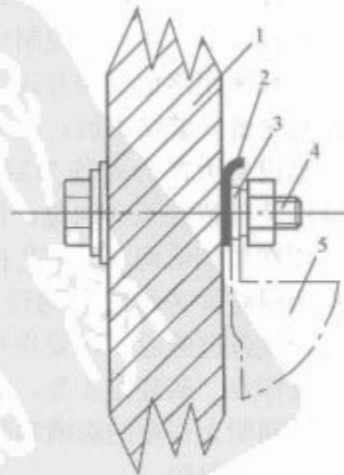


图 10.1-5 用螺栓直接紧固在木质围板上
1—木壁; 2—接地片;
3—锡箔; 4—螺栓;
5—设备

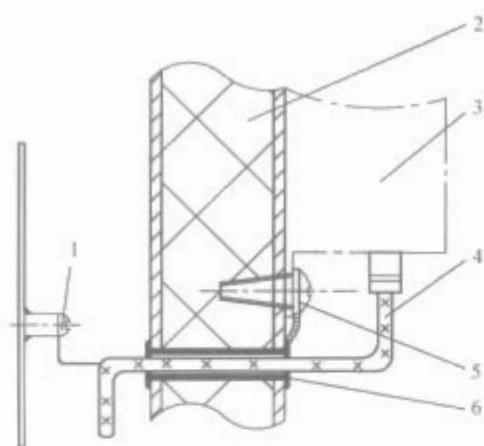


图 10.1-6 用自攻螺钉直接紧固在复合岩棉板上

1—接地柱；2—复合岩棉板；3—电气设备；
4—电缆；5—自攻螺钉；6—电缆衬套

(4) 嵌入式电气设备用自攻螺钉直接紧固在复合岩棉板上，见图 10.1-7。

(5) 紧固在具有硬质封闭板的支架上，见图 10.1-8。

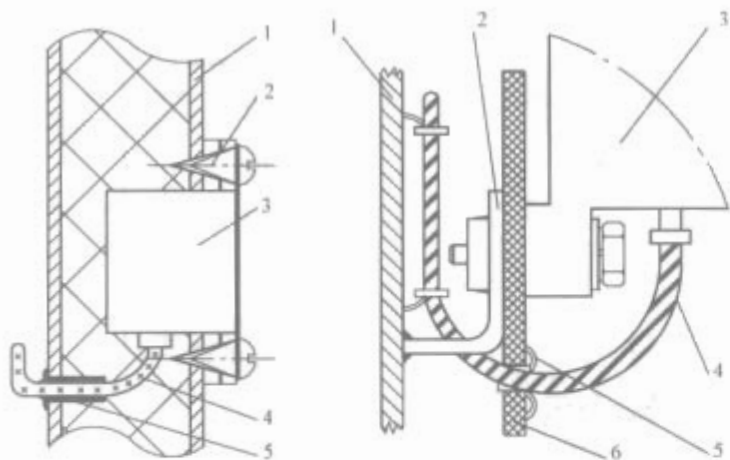


图 10.1-7 嵌入式电气设备用自攻螺钉直接紧固在复合岩棉板上

1—复合岩棉板；2—自攻螺钉；3—电气设备；4—电缆；5—电缆衬套

图 10.1-8 紧固在具有硬质封闭板的支架上

1—舱壁；2—支架；3—设备；4—电缆；5—尼龙护套；6—封板钉

(6) 用支柱紧固在复合岩棉板上，见图 10.1-9。

(7) 用支架紧固在复合岩棉板上，见图 10.1-10。

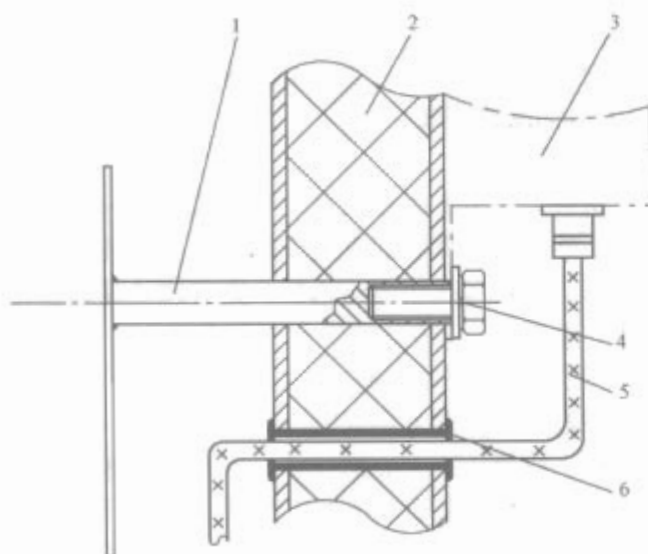


图 10.1-9 用支柱紧固在复合岩棉板上

1—支架；2—复合岩棉板；3—电气设备；4—螺栓；
5—电缆；6—电缆衬套

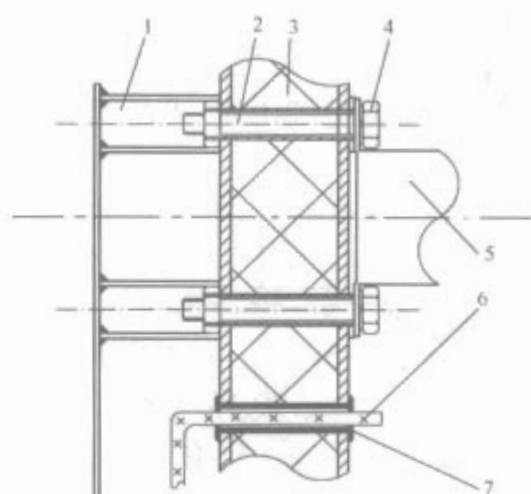


图 10.1-10 用支架紧固在复合岩棉板上

1—安装支架；2—衬套；3—复合岩棉板；
4—螺栓；5—电气设备；6—电缆；7—电缆衬套

5.3 在舱顶上安装

5.3.1 普通舱顶

(1) 舱顶灯的安装见图 10.1-11。

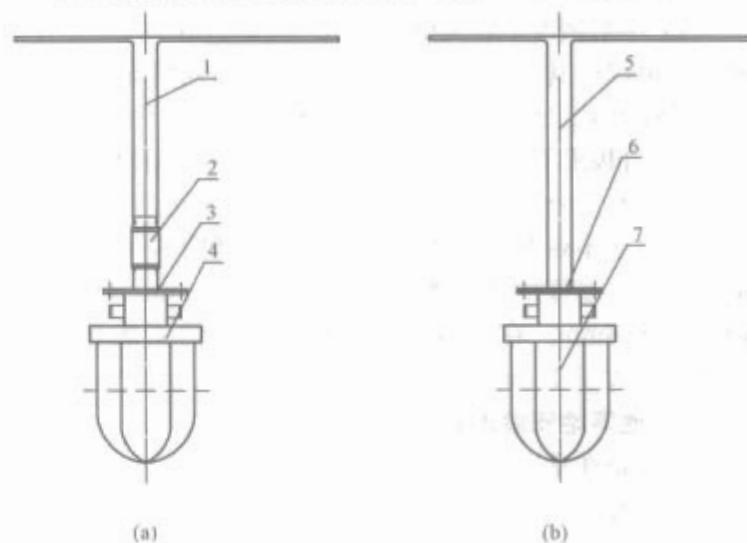


图 10.1-11 舱顶灯安装

(a) 安装形式一；(b) 安装形式二

1、5—镀锌钢管；2—连接器；3、6—安装底板；4、7—舱顶灯

(2) 荧光灯的安装。见图 10.1-12。

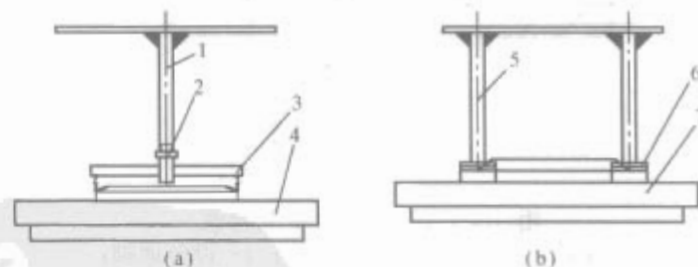


图 10.1-12 荧光灯安装

(a) 安装形式一；(b) 安装形式二

1、5—镀锌钢管；2—连接器；3—吊架；4、7—荧光灯；6—安装板

5.3.2 具有封闭板或装饰板的舱顶

(1) 防水式舱顶灯和荧光灯，可采用图 10.1-11 (b) 和图 10.1-12 (b) 安装形式，但灯的安装板须低于顶部封闭板 30mm 左右。

(2) 使用白炽灯泡的顶棚灯和具有镇流器的荧光灯，因其使用时会产生较高的温度，不能直接安装在木质顶板上，须采用木质垫板明装或在顶板上开孔并在顶板内加木质框架作嵌入式安装。

(3) 非防水式灯具在复合岩棉板作顶板的情况下，可在顶板上开孔并在顶板内加金属型材框架作嵌入式安装。

(4) 在舱顶上安装顶式风扇时, 为保证足够的安全高度, 一般采用如图 10.1-13 所示的安装形式。在舱室净高比较高时, 也可将风扇座与顶板持平, 取消装饰盆。

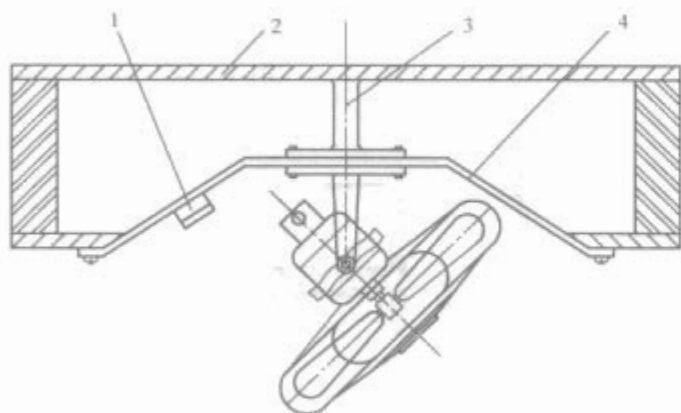


图 10.1-13 顶式风扇安装

1—插座；2—舱顶；3—风扇座；4—装饰盆

5.4 落地安装

5.4.1 主配电板、应急配电板、机舱集控台、驾控台、压载控制台等大型设备

(1) 一般情况下, 大型设备出厂时都自带基座。对于这类设备, 可以待其正确就位后, 用焊接的方法将设备的自带基座与甲板固定。此时, 安装甲板的不平整度应不大于 4mm/m, 全长允许极限不大于 6mm。基座的焊接可采用间隔焊, 焊接长度不小于 75mm, 间隔不大于 150mm, 转角处应包角焊。

(2) 对于不带基座的大型设备, 采用螺栓紧固在船厂配备的基座上。基座的不平整度应不大于 1mm/m, 全长允许极限不大于 6mm。在安装前, 应核对基座的安装孔尺寸, 其误差应不大于 1.5mm。

5.4.2 其他落地安装的设备

(1) 设备在基座上安装, 见图 10.1-14。

(2) 设备在甲板上安装, 见图 10.1-15。

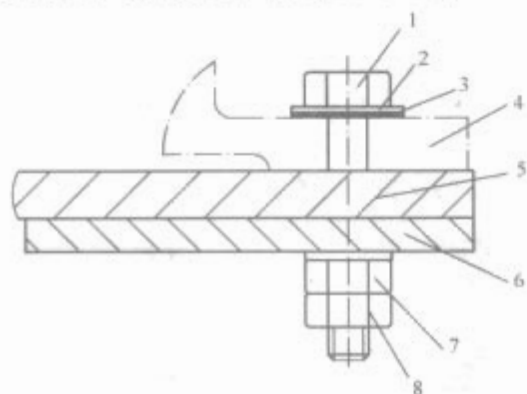


图 10.1-14 在基座上安装

1—螺栓；2—平垫圈；3—锡箔；4—设备地脚；5—木垫或橡皮；6—基座；7、8—螺母

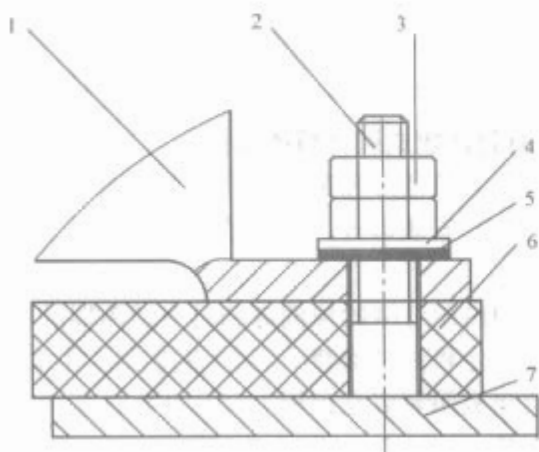


图 10.1-15 在甲板上安装

1—设备底脚；2—螺栓；3—螺母；4—平垫圈；5—锡箔；6—木垫或橡皮；7—甲板

(3) 常见设备安装形式。

1) 落地式旋转工作灯, 见图 10.1-16。

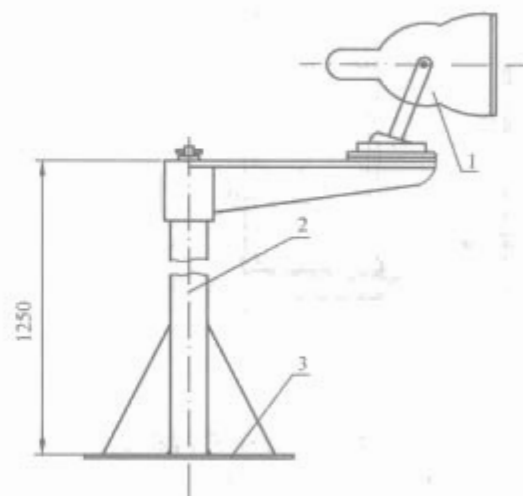


图 10.1-16 落地式旋转工作灯安装 (mm)

1—工作灯；2—灯座；3—甲板

2) 主令控制器, 见图 10.1-17。

3) 凸轮控制器, 见图 10.1-18。

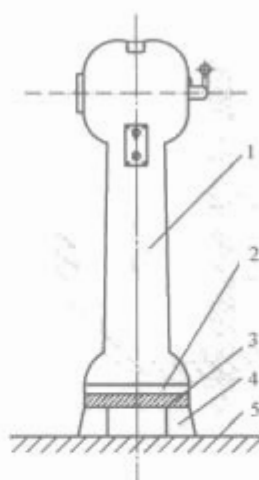


图 10.1-17 主令控制器
安装

1—主令控制器；2—帆布垫；3—木垫；4—基座；5—甲板

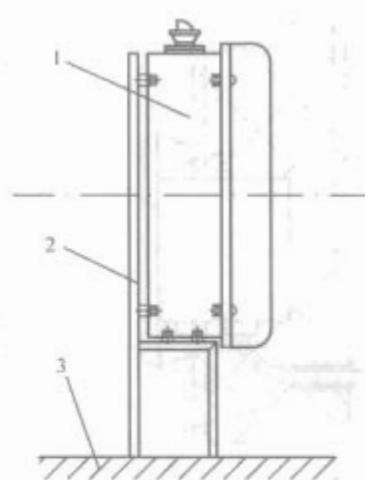


图 10.1-18 凸轮控制器
安装

1—凸轮控制器；2—架座；3—甲板

5.5 暗装

5.5.1 设备暗装的条件及适用场合

在舱内通道壁上的设备, 若舱壁后有足够的空间能满足设备暗装要求的情况下, 采用暗装 (即嵌入式安装) 方式, 可使走道畅通, 保证人员通过时的安全, 并提高美观性; 在有装饰性封闭板的舱室内, 更有必要采用暗式安装。

5.5.2 设备的暗式安装

5.5.2.1 普通舱壁

按设备嵌入部分的外形尺寸 (每边放宽 2~3mm) 在舱壁上开孔, 然后在舱壁背面安装支架, 设备安装后在正面加装装饰边框。如设备自带装饰边框, 则必须使其遮盖在舱壁上开的孔, 见图 10.1-19。

5.5.2.2 具有封闭板的舱壁

按设备嵌入部分的外形尺寸 (每边放宽 2~3mm) 在封闭板上开孔。质量小于 1kg 的设备, 可直接用木螺钉 (木质封板) 或自攻螺钉 (复合岩棉板) 紧固在封板上; 质量为 1~5kg 的设备, 在安装封闭板时, 须在封闭板后加装加强木挡或木框 (木质封板) 或金属型材框架 (复合岩棉板), 以增强设备的紧固强度; 质量大于 5kg 的设备, 在敷设热绝缘之前, 须在舱壁上焊装设备安装支架, 该支架的高度应使其

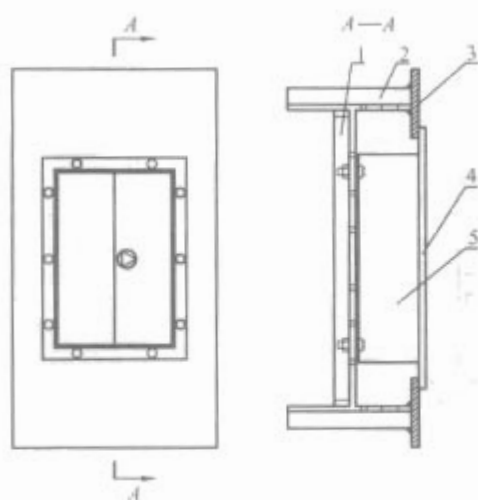


图 10.1-19 普通舱壁暗装

1、2—支架；3—舱壁；4—装饰框；5—设备

与封闭板的背面持平，并具有设备嵌入部分的框架，给封闭板开孔提供依据，而且支架上的设备安装孔应为带螺纹的，便于设备安装。见图 10.1-20。

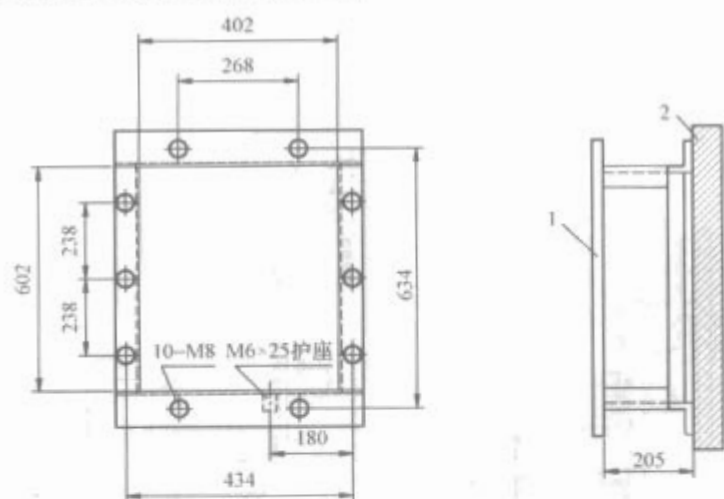


图 10.1-20 具有封闭板舱壁设备暗装支架 (mm)

1—舱壁；2—舱壁封闭板

5.6 带减震器设备的安装

5.6.1 带减震器设备的安装要求

(1) 设备安装所用的减震器型号、规格和数量应符合设计图纸的规定。

(2) 减震器在安装前须检查本身的质量，应无裂痕及老化现象；带橡胶成分的减震器还须注意是否超过规定的保存期。

(3) 减震器的安装高度应一致，同一设备的减震器应受力均匀。

(4) 同一设备的减震器安装时应考虑各方向的受力影响，安装 3 只减震器的，应按图 10.1-21 所示布置，安装 4 只减震器的，应按图 10.1-22 所示布置，数量多的也应参照这一原则布置。

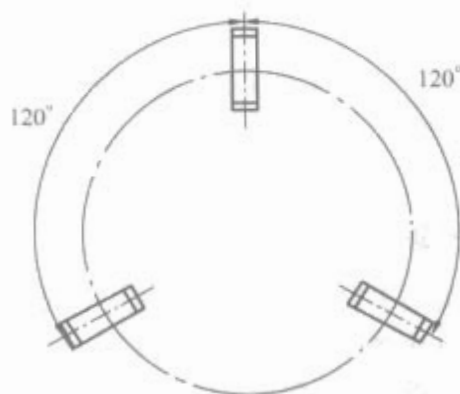


图 10.1-21 3 只减震器布置

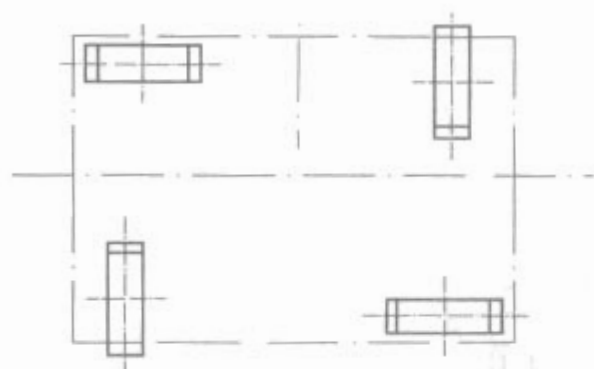


图 10.1-22 4 只减震器布置

(5) 设备安装减震器后，不能使设备因震动而触及舱壁或其他物体，应不妨碍设备能在所有方向上有不小于 25mm 的自由位移。

(6) 设备（尤其是大型设备）连同减震器安装后，须经过一昼夜以上的时间，使其状态稳定后，才能引入电缆或导管等。

5.6.2 常用减震器安装方法

(1) 设备通过 E 型 (EA 型) 减震器固定在支架上，见图 10.1-23。

(2) 设备通过 B 型减震器固定在支架上，见图 10.1-24。

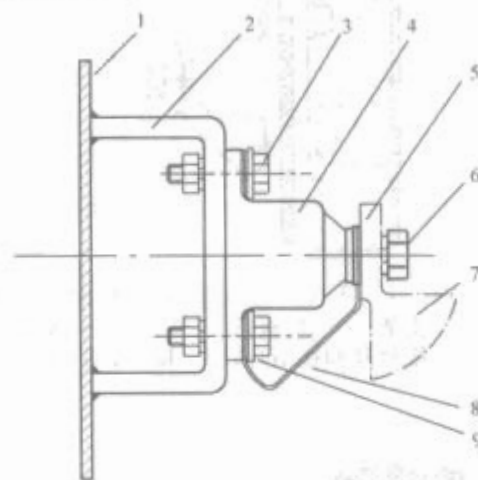


图 10.1-23 E 型 (EA 型) 减震器固定在支架上

1—舱壁；2—支架；3、6—螺栓；4—减震器；5—锡箔片；7—设备；8—接地片；9—锡箔垫片

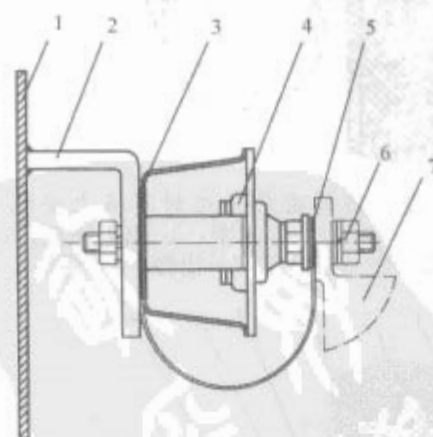


图 10.1-24 B 型减震器固定在支架上

1—舱壁；2—支架；3—锡箔垫片；4—减震器；5—锡箔片；6—螺栓；7—设备

(3) 设备通过 T 型减震器固定在支架上，见图 10.1-25。

(4) 设备通过钢丝减震器固定在支架上，见图 10.1-26。

(5) 具有封闭板的舱壁上减震器的安装，见图 10.1-27、图 10.1-28 和图 10.1-29。

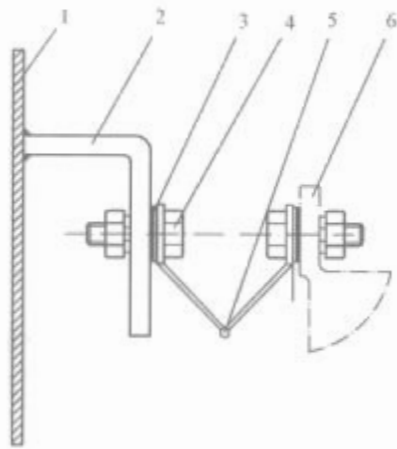


图 10.1-25 T型减震器固定在支架上
1—舱壁；2—支架；3—锡箔垫片；4—螺栓；
5—减震器；6—设备

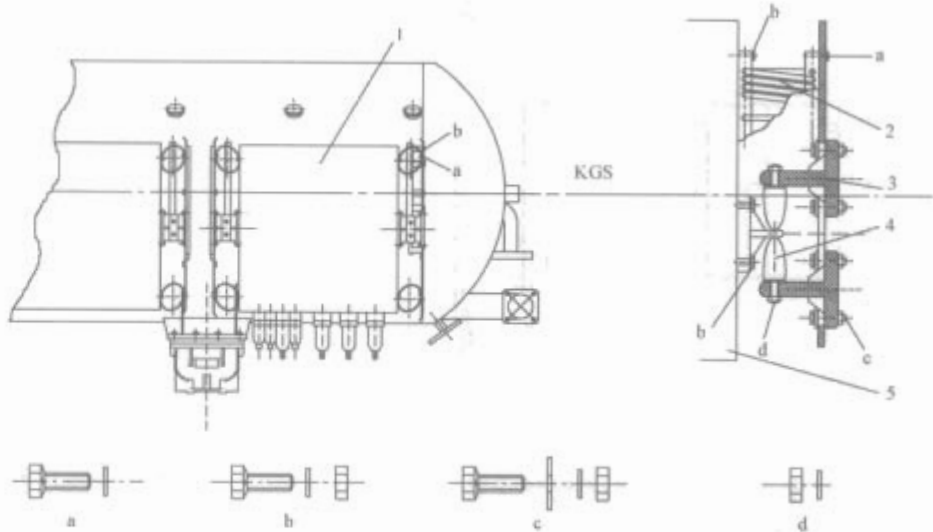


图 10.1-26 钢丝减震器固定在支架上
1—电气设备；2—减震器；3—限位器；4—橡胶减震器；5—电气设备

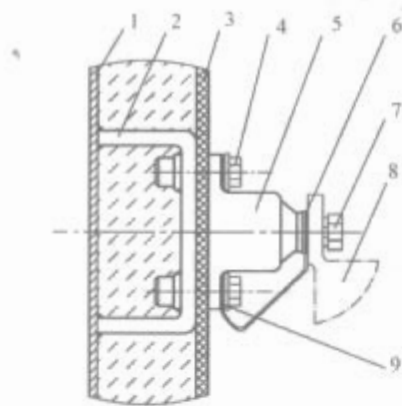


图 10.1-27 E (EA) 型减震器在封闭板上安装
1—舱壁；2—支架；3—封板；4—螺栓；5—橡皮减震器；
6、9—接地片和锡箔片；7—螺栓；8—设备

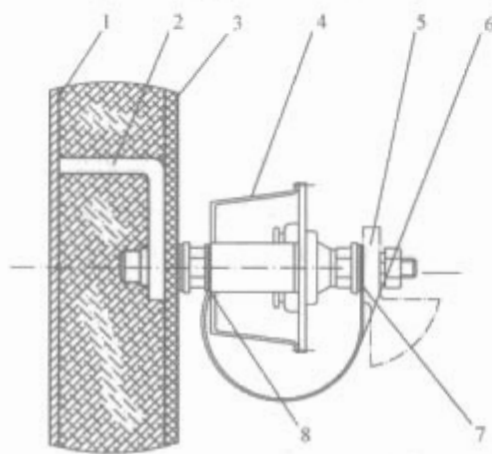


图 10.1-28 B型减震器在封闭板上安装
1—舱壁；2—支架；3—封板；4—B型减震器；
5—设备；6—接地片；7—锡箔；8—锡箔

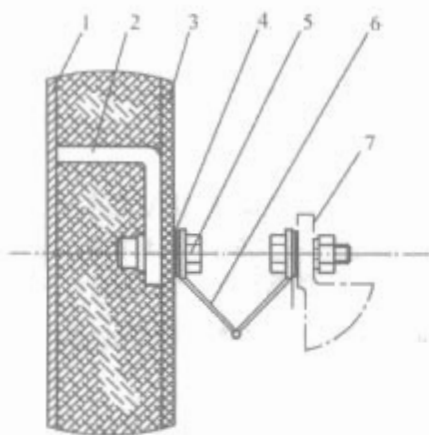


图 10.1-29 T型减震器在封闭板上安装
1—舱壁；2—支架；3—封板；4—锡箔；
5—螺栓；6—减震器；7—设备

(6) 铝质舱壁上减震器的安装，见图 10.1-30、图 10.1-31 和图 10.1-32。

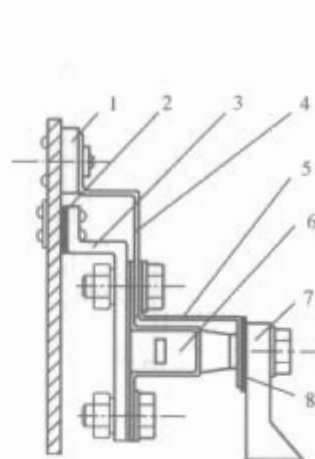


图 10.1-30 E (EA) 型减震器在铝质舱壁上安装
1—接地装置；2—帆布；3—支架；
4、5—接地片；6—减震器；7—设备；8—锡箔

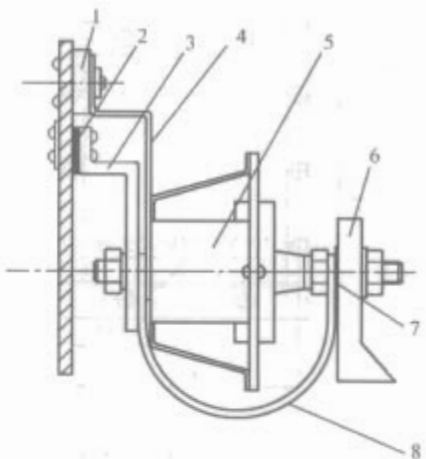


图 10.1-31 B型减震器在铝质舱壁上安装
1—接地装置；2—帆布；3—支架；
4、8—接地片；5—减震器；
6—设备；7—锡箔

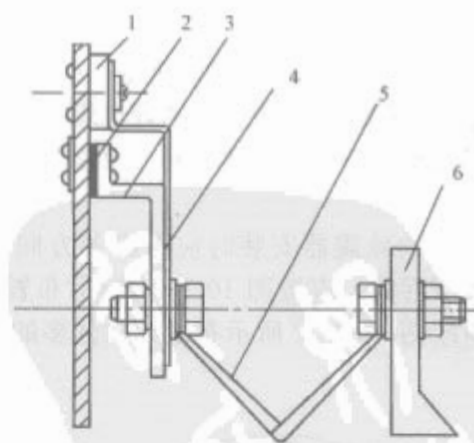


图 10.1-32 T型减震器在铝质舱壁上安装
1—接地装置；2—帆布；3—支架；4—接地片；
5—减震器；6—设备

5.7 设备紧固要求

(1) 设备安装支架应有足够的强度，焊接应牢固。

(2) 紧固件应镀锌或具有防腐蚀性能。设备紧固应设置弹簧垫圈及平垫圈，弹簧垫圈应设在螺母一侧。如用两只螺母锁紧或采用其他锁紧装置时，可不设弹簧垫圈。

(3) 螺栓、螺母紧固后,螺栓的螺纹应伸出螺母 2~3 牙。采用搭牙螺钉紧固时,螺钉旋紧后其搭牙部分的深度应不小于螺钉直径的 0.8 倍。

6 蓄电池的安装

6.1 安装要求

(1) 充电功率(蓄电池的额定电压与最大充电电流值的乘积)大于 2kW 的蓄电池组,应安放在专用舱室内。若安放在露天甲板上,则可以安放在箱或柜中。

充电功率小于或等于 2kW 的蓄电池组可以安放在箱或柜中。在机舱内若条件不许可,则可以敞开安放在通风良好的地方。

蓄电池组不得安放在生活区域内。

(2) 每只蓄电池周围的间隙应大于 20mm,并应用不吸潮、耐电解液腐蚀的绝缘材料楔隔、衬垫和固定。并采取措施,防止漏出的电解液与船体接触。一般采用在蓄电池底部以厚度不小于 2mm 的青铅皮或其他耐酸、碱腐蚀的材料制成的托盘加以衬垫,托盘的四周高度应不小于 45mm。

(3) 蓄电池组的安装应便于更换、检测、充液和清洁。上、下层蓄电池之间应留有不小于 300mm 的空间。

(4) 酸性蓄电池和碱性蓄电池不应安放在同一舱室、箱或柜中。

(5) 蓄电池室、箱、柜应有独立通风装置,其出风口在顶部,进风口在底部,并有防止水和火焰进入的措施,出风管应直通开敞甲板外。

除通风口外,蓄电池室的其他开孔均应作有效封闭,以防爆炸性气体进入邻近舱室。

(6) 蓄电池室的门、箱、柜的外面应有“禁止烟火”的标志。

(7) 原动机起动蓄电池,应尽可能接近该原动机安装。若此时蓄电池不能设置在蓄电池室内,则其安装处应有适当通风。

(8) 蓄电池接线时,应将接线柱上的灰尘、防腐脂(如有的话)、氧化层清除掉,以保证接触良好。接线结束后,所有接线柱和导线端头、紧固件应用凡士林等油脂涂封,以耐腐蚀。

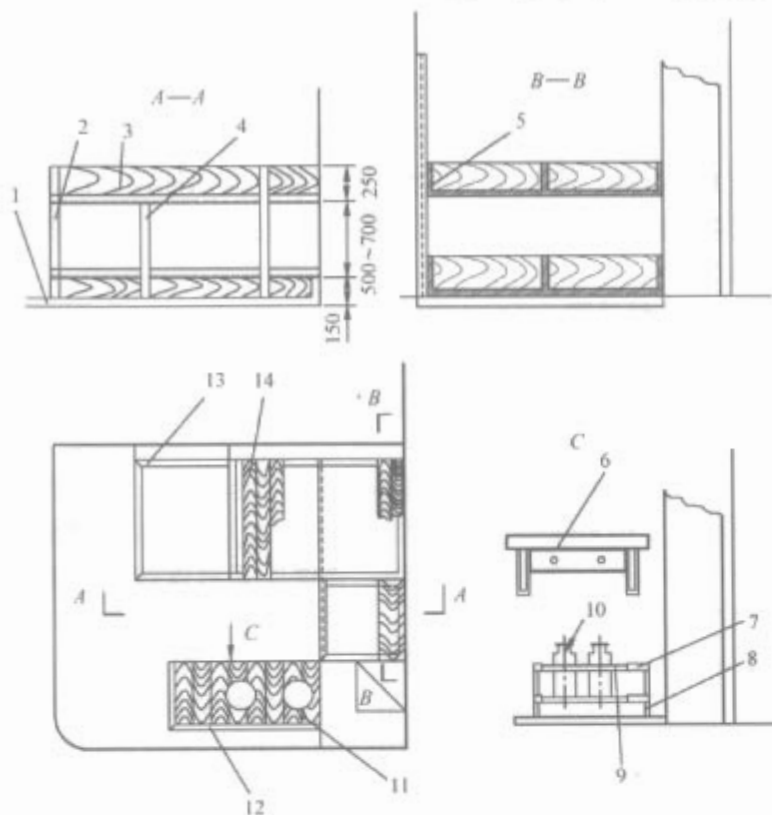


图 10.1-33 蓄电池安装搁架及蓄电池室的布置

1—水泥铺面;2—搁角架;3、13—挡板;4—支脚;5—青铅铺面层;6、9—搁架;7、12—蒸馏水瓶;8—脚;10—蒸馏水瓶;11、14—搁板

6.2 安装方法

(1) 安装在蓄电池室的搁架上。蓄电池安装搁架及蓄电池室的布置见图 10.1-33。

(2) 安装在专用的蓄电池箱、柜内。蓄电池箱、柜可用耐腐蚀的玻璃钢材料制造,也可以用木板或钢板制造(如用钢板时,则应内铺木板),再衬垫青铅皮,两端有进出气管。蓄电池箱如放置在舱外露天部位,应用防水结构,见图 10.1-34。

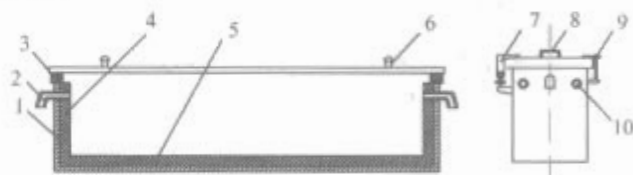


图 10.1-34 防水式蓄电池箱

1—箱体;2—出气管;3—密封橡皮条;4—木板;5—青铅;
6、8—把手;7—水密铰链;9—压紧装置;10—填料函

(3) 安装在机舱内的蓄电池搁架上。蓄电池安装在机舱内的蓄电池搁架上见图 10.1-35。

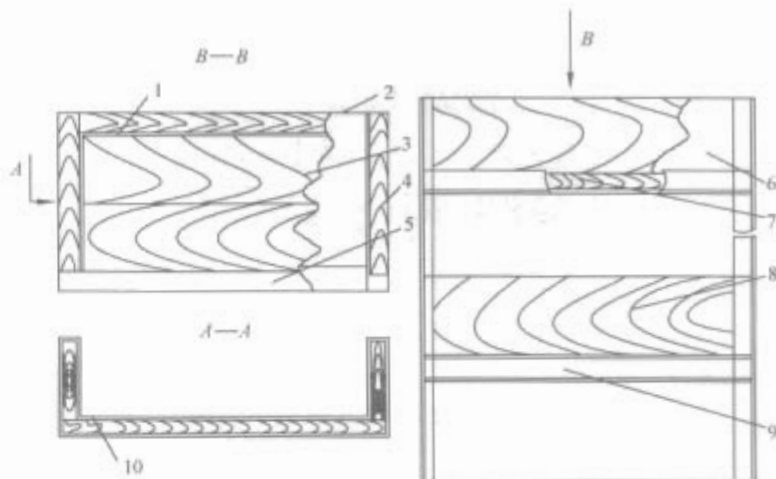


图 10.1-35 蓄电池搁架

1—2cm 厚的青铅皮;2—角铁架;3—搁板;4—木板;
5、8—挡板;6—青铅;7—搁板;9—角铁架;10—青铅

7 电气设备接线

7.1 接线的准备工作

(1) 准备有关的电气接线图。比较简单的设备,没有专门的接线图(如照明系统),可查阅有关的系统图,对接入设备的电缆代号、型号规格、接线情况、接线的特殊要求要做到心中有数。

(2) 准备材料。根据读图了解的情况,准备必需的材料,如绝缘包扎用的胶带、端头标志用的塑料套管、制作芯线端头的接头、捆扎线芯用的扎带、电缆标牌、接地用的导线与锡箔片、填料函密封橡皮圈等。

(3) 准备工具。除了常用电工工具之外,还有制作接头用的冷压工具、填料函紧固工具等。必要时准备临时照明灯具。还要准备好万用表,以备校线用。

7.2 接线程序及操作要点

7.2.1 设备的进线

(1) 根据图纸核对所要接线的设备电缆到位情况,对电缆代号、型号规格、长度(如果太长或太短,都要到电缆的另一端查验)加以确认。

(2) 根据不同的设备,确定进线方式:

1) 防水式设备,通过填料函进线,如图 10.1-36 所示。

2) 防滴式设备, 用托线板固定进设备电缆, 如图 10.1-37 所示。

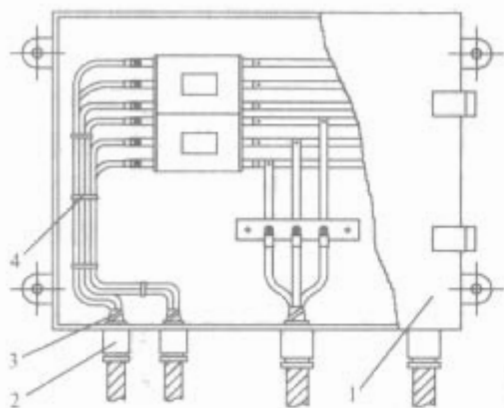


图 10.1-36 电缆进入防水式设备
1—分电箱；2—电缆填料函；3—聚氯乙烯胶带；
4—尼龙扎带

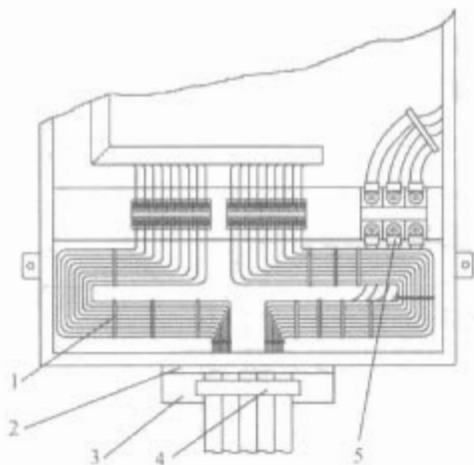


图 10.1-37 电缆进入防滴式设备
1—尼龙扎带；2—封口板；3—托线板；
4—不锈钢扎带；5—标志套管

3) 大型设备 (配电板、组合起动屏等), 从电缆筒引入电缆, 如图 10.1-38 所示。

(3) 引入电气设备的电缆, 其弯曲半径应不小于下列要求:

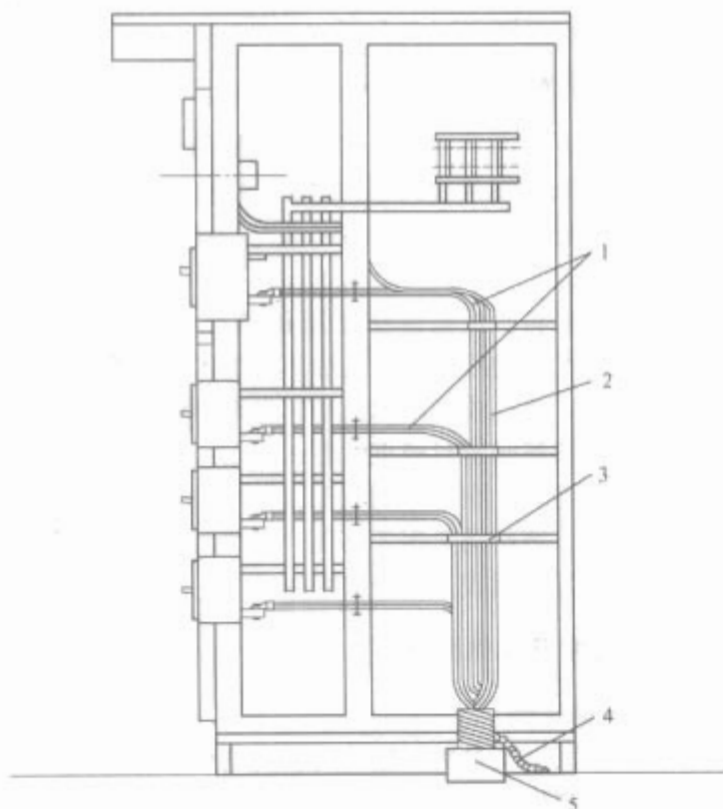


图 10.1-38 电缆进入大型设备
1—绝缘护套；2—聚氯乙烯保护套；3—包塑 (滞燃)；
4—金属编织保护套；5—电缆筒

1) 铠装电缆 (金属护套): 弯曲半径不小于电缆直径的 6 倍。

2) 其他护套电缆: 弯曲半径不小于电缆直径的 4 倍 (电缆直径 $\leq 25\text{mm}$) 或电缆直径的 6 倍 (电缆直径 $> 25\text{mm}$)。

不同直径的电缆进入同一设备, 应以最粗的一根电缆为基准, 使所有的电缆保持相同的弯曲度, 做到整齐划一。

相邻设备的进线也应做到整齐划一。

(4) 进入设备的电缆应保持一段直线段。电缆引入防水设备时, 在填料函前的电缆应有大于或等于填料函螺母高度 1.5 倍的直线段。进入防滴式设备的电缆应保持 100mm 左右的直线段。

7.2.2 电缆护套的切割

(1) 根据设备接线端子分布情况及电缆截面, 确定护套切割长度:

1) 电缆芯线截面 $\leq 4\text{mm}^2$ 时, 电缆进入设备后保留芯线长度为沿设备内壁到最远的接线端子再加 100mm 左右。

2) 电缆芯线截面 $\geq 6\text{mm}^2$ 时, 芯线保留长度为沿设备内壁到所要接线的端子并考虑芯线间互换性的长度。

如原来的电缆过长, 可以将多余的电缆先切割, 然后再进行护套切割工作。

(2) 电缆护套的切割不得损伤芯线绝缘, 因此操作时要特别小心控制刀具的切割深度, 并注意不能将手放在刀刃移动的前方, 防止割伤自己的手。

部分电缆在护套与芯线的包裹物之间有滑石粉或相互间摩擦系数较小, 而切割长度又不是很长, 可以考虑在确定切割部位处沿圆周将护套割断, 然后就能较方便地将整段护套勒下, 这种方法工作效率高, 又不容易损伤芯线绝缘, 应优先考虑此操作法。

(3) 电缆护套的切割部位, 一般的设备应在进入设备内壁 3~5mm 处剥去; 对内部空间较大的设备, 如主配电板、应急配电板等, 护套应在距接线柱 200mm 处剥去; 截面较大的三芯电缆可适当剥得长一些, 以方便接线。总的原则是: 进入设备的电缆都应有固定的措施, 而固定部位的电缆护套不应剥去, 不能使紧固的力直接加到芯线上。

(4) 金属编织护套的切割应符合有关电缆接地工艺的要求, 切割后应在切割处用绝缘胶带包扎。

(5) 对于接线图中明确标明的或施工说明中规定的信号电缆的屏蔽层, 应按图纸要求进行处理, 要求屏蔽层保留到接线端子附近的电缆护套和屏蔽层, 不应在电缆进入设备时就剥去。

7.2.3 芯线处理

(1) 进入白炽照明灯、电阻箱、电暖器等产生高温的设备, 如芯线会受到发热元件的热量辐射影响的, 则应套玻璃丝套管或黄蜡管保护。

(2) 进入电阻箱、电热器等产生高温的设备, 如芯线直接连接到发热元件的, 应将芯线绝缘层剥去 (在靠近护套处留 10~15mm), 套以瓷珠绝缘, 瓷珠应紧密连续地套至端部以免产生短路。

7.2.4 引入设备处电缆的紧固

(1) 引入设备处的电缆, 在进口处应牢靠固定。对有填料函的设备, 可利用填料函固定 (见图 10.1-36); 如无填料函, 则应设有托线板或其他紧固件 (见图 10.1-37)。

(2) 填料函压紧后, 电缆不能有松动现象, 护套应露出设备内壁 3~5mm, 填料函螺母应留有 2~3 牙螺纹长度。

(3) 用托线板紧固电缆, 应使电缆护套露出设备内壁 3

~5mm, 封口板的开孔尺寸应与电缆束尺寸相符。

7.2.5 设备的接线

7.2.5.1 芯线的捆扎

(1) 除了开关、接线盒等小型设备, 进入设备的截面为 4mm^2 及以下的芯线应妥为捆扎, 以防松散。 6mm^2 以上的芯线如长度较长, 也应适当捆扎。

(2) 在捆扎前, 应先将电缆的芯线理直, 并根据接线图在每根芯线端头套上标志套管, 并采取措施防止标志套管在捆扎过程中脱落。常用的方法是, 较细的芯线在端头处打一个结, 较粗的芯线在端头处弯折或对折, 能有效防止套管脱落。

(3) 按接线图和接线端子实际排列的位置, 将芯线的走向考虑好, 特别要注意同一根电缆的芯线接到不同的接线端子排的情况。

(4) 芯线束可以沿塑料敷线槽引到接线端子旁, 这样, 芯线束可不用捆扎。芯线束捆扎时应沿设备内壁进行, 尽可能留出接线和维修的空间; 捆扎一般用小型尼龙扎带, 较粗的电缆芯线也可用较宽的尼龙扎带。所采用的尼龙扎带、塑料敷线槽应具有船检证书, 应牢靠、滞燃、不吸潮。

(5) 备用芯线一般应单独捆扎, 捆扎前套上标志套管, 写清电缆代号、芯线号。

7.2.5.2 芯线端部接头

(1) 芯线的端部一般应有接头。如线芯截面为 4mm^2 及以下, 设备的接线柱为具有压板插入式连接, 则可不设接头。

(2) 接头与线芯可采用冷压连接。所有冷压接头必须使用专用工具进行压接, 专用工具的压模应按接头的规格选用。接头的接线孔径应略大于设备接线柱的直径。

(3) 芯线绝缘层切割时不得损坏导体, 且切口应平整, 其切割长度应等于导体插入接头套筒的长度加上 $1\sim 2\text{mm}$ 。如端头无接头, 其绝缘的切割长度应等于插入式接线柱的插接长度。

(4) 接头压接前, 应除去线芯导体上的绝缘膜、残渣、油污。

(5) 压接后的接头, 连接管应无裂口, 压痕应在连接管中间位置反面。用手拉动, 线芯与接头应无松动, 更不应

脱出。

7.2.5.3 接线

(1) 将芯线按图样编号正确接至设备接线柱。芯线端头的标志应与接线柱编号相同, 如果设备接线柱的标记与原理线路图不相同, 则应在标志套管上同时写上设备接线柱的标记, 并标上括号。为便于调试和检修, 一般在标志套管的另一面标上电缆代号。

(2) 接线的紧固应牢靠、整齐, 应设有防止松脱的措施, 如采用弹簧垫圈或锁紧螺母、保险垫片等。在接头两侧应设置平垫圈, 弹簧垫圈应与螺母接触。

(3) 每一接线柱上一般只能接两个接头, 如果同一极上有多根线头, 则应分设接线柱或采用其他措施。

(4) 不得用紧固接线柱的螺母来紧固线芯接头。

(5) 芯线标记上的字母、号码应清晰、整齐、耐久而不褪色。标志套管在接头压接后移至芯线端部, 同一设备的芯线标记应排列成同一方向, 且不应将字母和号码倒置。为便于识别, 在号码右下角应加小圆点标记。

(6) 在发电机、电动机等振动比较大的设备内接线, 要避免芯线与芯线、芯线与接线柱或其他部件之间的摩擦, 不同相的芯线之间、芯线与金属构架之间应留有间隙, 不得紧压在一起, 以免造成日后的接地或短路故障。

(7) 接线工作完成后, 应按接线图检查一遍, 看有否错接、漏接, 并检查线头紧固情况, 然后将设备内部的线芯残留物、多余材料等清除, 最后将设备的门关好或将盖子盖好。

8 检验规则

(1) 设备安装的形式应与所处环境相适应, 其工艺措施应与本章第2节、第3节的要求相符。

(2) 设备安装支架应牢固平整。

(3) 设备安装整齐, 无歪斜; 紧固件选择恰当, 紧固可靠。

(4) 设备接地可靠。有专门接地要求的, 应检测设备的接地电阻值, 并符合相应要求。

(5) 设备接线应正确、可靠、整齐、美观, 端头标志清晰、整齐、与接线柱相符。



第2章 船舶电缆敷设工艺

1 概述

1.1 主题

1.1.1 船舶电缆敷设工艺的特点

(1) 随着船舶电气化程度的不断提高,装用的电气、电子设备日益增多,相应的采用多种电缆组成功能各异的系统。限于船上一般环境比较狭小,除了要安装许多电气、电子设备和机械及船舶装置外,还要敷设许多不同性能的电缆。因此必须认真考虑并妥善处理,力求做好电缆敷设工作,使各系统能发挥正常的功能。

(2) 船舶敷设电缆工作是一项劳累和细致的工作。到目前为止,国内外造船业作的电缆敷设工作基本上是以人工操作为主,借助一些辅助工具进行施工。因此我们从事船舶设计和建造的工程技术人员均应努力改进电缆敷设工艺,以期减轻工人的劳动强度,并提高工作效率。

1.1.2 船舶电缆敷设的工艺要求

(1) 基于上述船舶电缆敷设工艺的特点,必然对该项工作提出了一些较高的要求,保证电缆敷设后要符合有关的技术要求。而且还要求电缆敷设美观、布置合理。

(2) 由于工艺方法来源于施工实践,所以一定程度上是施工经验的提炼和总结,应不断变化,力求改进才能提高功效,不应看成是固化不变的东西。但是改进必须严谨慎重,坚持科学的态度,实践出真知,切莫轻易否定过去成熟的经验,以免造成不必要的损失。

1.2 说明

由于船舶电缆敷设的工艺内容很多,难以一一阐述详尽,本章仅对一般钢质船舶电缆敷设的工艺要求作重点介绍。对于特殊工作的船舶电缆敷设的特殊要求应另行规定,具体工艺方法按产品专用的施工工艺文件的规定施工。

2 电缆册编制

鉴于船舶电缆敷设的劳动强度较高,为了尽量改善劳动条件,保证船上顺利施工,先将船上所有电缆分类,并按照电缆实际拉敷的程序编号,干线电缆设定停止点标记等,反映在电缆册中,作为电缆拉敷的依据,使敷设电缆工作能有条不紊地顺利进行。

2.1 干线电缆和分支电缆

(1) 凡是符合下列条件之一的即称干线电缆(又称总线电缆):

- 1) 贯穿甲板的电缆。
- 2) 穿过水密舱壁的电缆。

(2) 除去上述的干线电缆,其余均为分支电缆(又称局部或舱室电缆)。

2.2 干线电缆册编制

2.2.1.1 干线电缆分组条件

- (1) 起止点在同一层甲板内。
- (2) 起止点在同一水密舱段内。
- (3) 走向基本相同。

2.2.1.2 同组电缆拉敷顺序

- (1) 在紧固件中应由内向外排列。
- (2) 在紧固件中自下往上排列。
- (3) 在紧固件中先粗后细排列。
- (4) 分支转向相同的电缆,应一次排列。
- (5) 先拉敷长电缆(先远后近)。

2.2.1.3 拉敷点的选择

(1) 应有足够场地堆放拉敷的电缆,以便电缆从电缆备料筒中拉出可以存放,并可以使待拉放电缆圈成“8”字形的空间(如采用双向拉敷法)。

(2) 采用单向拉敷法,则拉敷点应选择在电缆首端附近;若采用双向拉敷法,则拉敷点应选在电缆停止点附近。

(3) 如电缆贯穿几层甲板,拉敷点应选择在本组电缆的最上层甲板,这样可以利用电缆自重向下拉敷,可以降低电缆拉敷的劳动强度。

2.2.1.4 中间停止点标记的确定和作用

(1) 避免干线电缆在拉敷时来回拉敷的麻烦,且较难确定引进设备的电缆长度。

(2) 便于自停止点标记,向首尾端同时整理及固定电缆。

(3) 停止点标记一般应选在电缆穿过的舱壁或甲板部位(或近旁的电缆贯穿件),且尽可能选择电缆中间位置,一般选用尾端标记。

2.2.1.5 干线电缆拉敷册的编制程序

- (1) 确定干线电缆束的走向和途径。
- (2) 确定干线电缆的数量及分组。
- (3) 跟有关生产设计(综合放样)的资料进行核对。
- (4) 确定拉敷点位置、中间停止点标记、同组电缆拉敷顺序。
- (5) 编制干线电缆拉敷册,其表格形式见表10.2-1。

2.3 分支电缆册编制

(1) 为了使拉敷电缆顺利施工,尽量减少工人无效走动,对分支电缆进行合理分组是有必要的,可达到每拉敷完一组电缆就进行整理、固定,即完成一段线路敷设的要求。并可为多个分组同时进行作业,提高功效。具体编号表格见表10.2-2。

(2) 由于分支电缆较短,规格较少,直径一般较细,所以为了减少电缆丈量及内场备料时间,并可节省电缆,可将常用规格的电缆筒吊运到船上施工现场,边拉敷边切割。

(3) 应考虑电缆切割卷筒的顺序。电缆切割的顺序应跟电缆卷筒的先后顺序相反,即先卷入电缆筒的电缆,实际在船上后拉敷,反之亦然。这一点对于干线电缆同样重要。

表 10.2-1 干线电缆拉敷册的表格形式

工程号		船厂名		干线电缆拉敷册							共 页			备注	
图号												第 页			
序号	特性	电缆代号	电缆型号	电缆规格	起点设备		电缆经过节点	终点设备		停止点	停止点前长度 (m)	总长度 (m)			
					设备名称	设备位置		设备名称	设备位置						
1	A	8P1-1	CEF82/SA	3×1.5	JB1/8P1	F/F114S	F3bF2a * MB37SM32	ST/SP1	M/F10S	MB37S	100	120			
2	A	8P1-2	CEF82/SA	2×1.5	JB1/8P1	F/F114S	F3bF2a * MB37SM32	ST/SP1	M/F10S	MB37S	100	120			
3	A	8P1-3	CEF82/SA	2×1.5	JB1/8P1	F/F114S	F3bF2a * MB37SM32	ST/SP1	M/F10S	MB37S	100	120			
4	A	8P1-4	CEF82/SA	2×1.5	JB1/8P1	F/F114S	F3bF2a * MB37SM32	ST/SP1	M/F10S	MB37S	100	120			
5	A	8P1-5	CEF82/SA	2×1.5	M2/8P1	F/F119S	F3bF2a * MB37SM32	ST/SP1	M/F10S	MB37S	100	120			

表 10.2-2 分支电缆册共体编号表格

工程号		船厂名					甲板分支电缆册	区域代号		共 页	
图号								A		第 页	
序号	特性	电缆代号	电缆型号	规格	起始设备	起始设备位置	电缆经过节点	终止设备	终止设备位置	长度 (m)	备注
1	A	10P10-1	CEF82/SA	3×1.5	ST/10P10	A/212	A65	M/10P10	A/212	12	
2	A	10P11-1	CEF82/SA	3×1.5	ST/10P11	A/217	A86	M/10P11	A/217	17	
3	A	2LP5-14	CEF82/SA	2×1.5	2LP5-14	A/213-1	A90A89A96A25A20A19A16	2LP5-15	A/204	45	
4	A	3LP3-1	CEF82/SA	2×1.5	3LP3	A/208	A1A3A69A15A17A37	3LP3-1	A/203	20	
5	A	3LP3-2	CEF82/SA	2×1.5	3LP3-1	A/203	A32A33	3LP3-2	A/205	18	

3 在船体构件和甲板上开孔与紧固件、组装件及安装件的焊接

3.1 开孔形状与大小

开孔一般应为圆形或腰圆形。如开孔为其他形状，则至少应有圆角。当设置电缆框，电缆筒或电缆管时，孔的大小应与所选定的电缆框、电缆筒或电缆管相称，不宜过大。

3.2 在甲板纵桁、横梁的腹板上开孔

在甲板纵桁、横梁的腹板上开孔，见图 10.2-1。

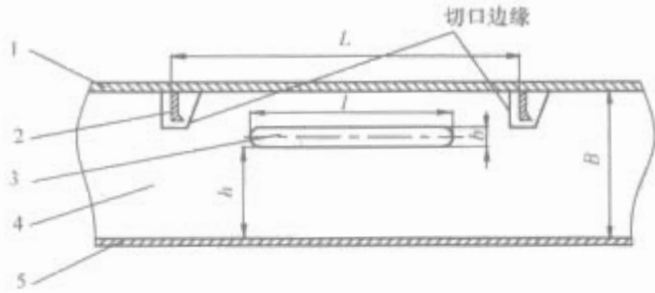


图 10.2-1 在甲板纵桁、横梁的腹板上开孔
1—甲板；2—横梁；3—孔；4—纵桁、腹板；5—纵桁面板

(1) 开孔高度 b 不得超过纵桁腹板高度 B 的 25%，开孔宽度 l 不得超过横梁间距 L 的 60%，否则应予以强度补偿；船长小于 60m 的船舶，经船检部门同意，开孔高度可适当放宽，开孔的端部应尽量做到与横梁穿过处的切口边缘等距离；开孔边缘至纵桁或横梁面板的距离 h 应不小于纵桁腹板高度 B 的 40%。

(2) 开孔应分散，不能同时密集在邻近的纵骨间距或肋距之内，如需开两个或两个以上的孔时，应沿水平方向布置，但所有孔的宽度之和不得超过纵骨间距或肋骨间距的 1/2。

如开孔不符合上述规定时，应予以强度补偿。

3.3 在甲板上开孔

(1) 开孔的形状应为腰圆形、椭圆形或圆形。腰圆形或椭圆形开孔，其长轴应尽量沿船艏线方向布置，且开口的长宽比不小于 2，以保证在相同的开孔面积情况下，尽量减小沿船宽方向的开孔宽度。

(2) 在船舫 1/2 船长的区域内的强力甲板上开孔，沿船宽方向的开孔尺寸不得超过货舱口至船边距离的 6%，其他处所甲板上开孔，腰圆形或椭圆形的开孔宽度不得超过舱口边线至船边距离的 9%，圆形的开孔则不超过上述距离的 6%。

如开孔不符合上述规定时，应予以强度补偿。强度补偿的要求见 ZB/U 06002—1989《船舶电缆敷设工艺》附录 A。

3.4 禁止开孔的部位

船体结构有些部位是禁止开孔的，其一般禁止开孔的部位见 ZB/U 06002—1989 附录 B。对于特殊船型、特殊材料的开孔需与船体部门充分协商后再进行开孔。

3.5 紧固件、组装件及安装件的焊接

(1) 紧固件、组装件及安装件的焊接应牢靠，应能保证电缆紧固和使用不致脱焊。

(2) 紧固件及其组装件的底脚不应直接焊接在上层连续甲板以下的船壳板上。

(3) 组装件或扁钢支架直接安装在横梁或肋骨上时，则与每一挡横梁或肋骨的接触处均应焊牢。

(4) 对开孔处兼作强度补偿的电缆框，应沿电缆框四周双面连续焊接，以保证强度；如开孔不需作强度补偿及无特殊要求时，其设置的电缆框允许采用间断焊接。

(5) 电缆填料函或电缆筒、填料盒、电缆围板等防火、水密安装件，应采用沿焊接处四周双面连续焊接，以保证水密性，焊接完毕清除焊渣后，应检查焊缝的水密性。

(6) 所有焊接好的紧固件、组装件及安装件应清除焊

渣，并涂以防锈漆。

4 电缆拉敷

4.1 概述

电缆拉敷是敷设电缆的首道工作，要求将电缆安置在线路的紧固件上，为了提高功效，可以利用拉敷电缆的空隙时间进行电缆敷设工作。

4.2 电缆拉敷前的准备工作

- (1) 检查电缆紧固件，贯通件安装及涂装质量。
- (2) 检查脚手架是否合适、牢固、应保证安全。
- (3) 检查线路附近的照明设施是否良好，亮度是否合适。
- (4) 按电缆册进行电缆切割卷筒，并编号。
- (5) 将电缆卷筒吊到船上施工合适的位置。
- (6) 施工人员应熟悉有关施工图纸和工艺文件的要求。
- (7) 确定电缆拉敷的方法（单向或双向拉敷）。

4.3 电缆拉敷工艺方法

电缆拉敷基本上有单向和双向两种方法。

- (1) 单向拉敷法一般适用于中小型船舶，当电缆既长又粗，则劳动强度较大，对电缆外层的磨损较大。
- (2) 双向拉敷法一般适用于大中型船舶，较长的纵向干线电缆，可减轻电缆外层的磨损。

4.4 电缆管内拉敷电缆的工艺要求

- (1) 电缆管路应力求平直少弯曲，管口应光滑无毛刺。
- (2) 一般可用引线将电缆引入管内，穿管系数应不大于 0.4。
- (3) 电缆管路较长的（如甲板电缆总管等），应在中间增设过渡箱或分线箱，以便电缆拉敷及中间支撑、分支等。

5 电缆敷设

5.1 电缆敷设工艺要求

- (1) 电缆敷设应尽可能平直，且易于检修。
- (2) 电缆敷设应避免潮气或水滴凝结的影响。
- (3) 电缆敷设应尽量远离锅炉、热管、电阻器等热源的影响。
- (4) 容易受到机械损伤的电缆应采取有效的防护措施。
- (5) 电缆敷设应避免跨越船体伸缩接头。如确实不能避免时，应将电缆弯成一个环形伸缩弯头，该长度应正比于船体伸缩长度。伸缩弯头的最小内半径应为电缆外径的 12 倍。
- (6) 导体最高工作温度不同的电缆不应敷设在一束内。如不可避免时，则该束电缆应以最低温度的电缆允许温度为限的工作温度。
- (7) 两路供电的电缆尽量远离敷设，提高电网供电可靠性。
- (8) 用于重要设备或应急设备的电缆应远离厨房、洗衣间等易于失火的危险区。
- (9) 干线电缆暗式敷设路径上的封闭板应便于开启、便于维修。
- (10) 电缆不应直接埋在绝缘层内敷设，以免影响电缆散热。
- (11) 应有限制火焰沿电缆束蔓延的措施。
- (12) 电缆敷设的弯曲半径应符合规范规定，见表 10.2-3

表 10.2-3 电缆敷设对弯曲半径的规定

电 缆 结 构		电缆外径 D (mm)	最小弯曲 内半径
绝缘	外护层		
热塑性材料 和弹性材料	金属护套、铠装和编织层	任何	$6D$
	其他外护层	≤ 25	$4D$
		≥ 25	$6D$
矿物	硬金属护层	任何	$6D$

- (13) 电缆应尽量分层分束敷设，每束一般应不超过两层。
- (14) 各种电缆的分类和各类电缆之间的最小距离应按 GJB 1046—1990《舰船搭接、接地、屏蔽、滤波及电缆的电磁兼容性要求和方法》的规定，以提高电磁兼容性。
- (15) 电缆一般不准紧贴舱壁或甲板敷设，间距不小于 20mm，改善电缆工作环境。
- (16) 冷藏场所内的电缆应明线敷设，且电缆与围壁之间应留有一定的空间，以减轻电缆受到腐蚀损伤。
- (17) 敷设在露天甲板或非金属上层建筑内的电缆，应采用全金属管保护。
- (18) 电缆应避免穿越易燃、易爆或有腐蚀性气体的场所，如无法避免，则应敷设在金属管内。
- (19) 电缆管或电缆槽均应保证电气连续性。水平敷设的电缆管和电缆槽应使内部不积水，必要时可设泄水装置。
- (20) 在油水易浸入的场所，电缆管或电缆槽的两端应用堵料进行堵封。
- (21) 电缆穿过非水密舱壁或船体构件时，应设置电缆框或衬套。电缆与内壁缝隙应不大于 12mm，并用堵料进行堵封，以防老鼠进入，损坏电缆和电气设备。
- (22) 电缆贯穿无密性要求的舱壁和甲板，在贯穿部位应采用具有适当高度的电缆筒或电缆管进行保护。
- (23) 电缆贯穿非水密舱壁或船体构件时，其电缆开口必须用电缆衬圈或其他经认可的材料制品作衬垫。若构件板壁厚度等于或大于 6mm，则可不加衬圈，但须适当对开口处倒圆角，以不损伤电缆。
- (24) 电缆贯穿有密性要求的舱壁和甲板，在贯穿部位应采用合适的电缆密封装置。
- (25) 对较易浸水处所的电缆应穿金属管敷设以保护电缆。
- (26) 电缆应尽量不穿过油舱或水舱，否则应用双层金属管或厚壁金属管敷设。
- (27) 容易引起爆炸的舱室内的照明电缆应穿金属管敷设。管路及与设备连接处均应密封。
- (28) 直流网络必须采用单芯电缆时，来回线路应紧靠敷设，以减少杂散磁场的影响。
- (29) 交流网络必须采用单芯电缆的措施应符合有关规范的具体规定。应尽量降低杂散磁场的影响。
- (30) 电缆必须通过耐火分隔，应采用电缆耐火密封装置，详见 CB 3386.1—1992《船舶电缆耐火贯穿装置 技术条件》、CB 3386.2—1992《船舶电缆耐火贯穿装置 耐火试验方法》的有关要求。
- (31) 垂直穿管敷设的电缆，如长度较长，应在中间采用电缆紧固措施，以免电缆承受较大的重力。中间的电缆紧固点的间距应不大于 6m。

5.2 消磁电缆敷设工艺要求

- (1) 消磁电缆应单独敷设，不应与其他电缆同束，且应

最先敷设。

(2) 消磁电缆应保证左右舷对称布置。

(3) 消磁电缆的型号规格应切实按图纸规定选用，不得任意更改。

(4) 未注明定位尺寸的消磁电缆，应尽量沿着舷壁、甲板、肋骨和舱壁成束敷设。

(5) 磁探测器的专用电缆单独敷设，电缆按规定长度不可切断。

(6) 消磁电缆穿过液舱、底舱、弹药舱等处所，可用电缆管敷设。

6 电缆紧固

6.1 电缆紧固工艺要求

(1) 电缆排列应平直、整齐，尽量不交叉。

(2) 电缆紧固后，电缆不能松动，但也不宜太紧，以免损伤电缆。

(3) 电缆的弯曲部位紧固力求美观，且弯曲半径符合技术要求。

(4) 电缆紧固件和附件的强度及固定均应符合要求，保证牢固。

(5) 水平敷设的电缆，尽量采用下托式，这样可使电缆的重量均由支架承受，较为可靠，且施工方便。

6.2 扎带紧固电缆的基本形式

(1) 用电缆支架和扎带紧固电缆，单层敷设见图 10.2-2，双层敷设见图 10.2-3。

(2) 用 L 形支架紧固电缆，见图 10.2-4。

(3) 用山字形支架紧固电缆，见图 10.2-5。

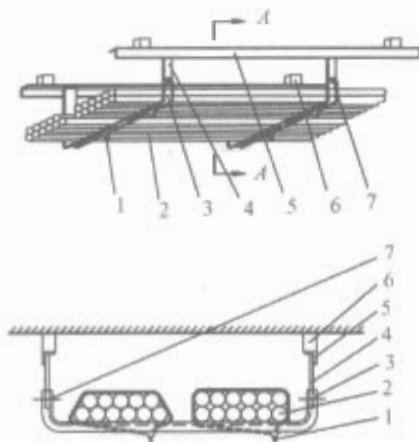


图 10.2-2 用电缆支架和扎带紧固电缆（单层敷设）
1—电缆扎带；2—电缆；3—U 型电缆支架；4—支脚；
5—角钢；6—底脚；7—螺栓、螺母

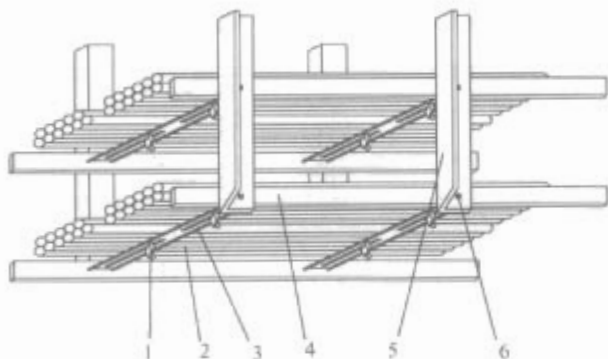


图 10.2-3 用电缆支架和扎带紧固电缆（双层敷设）
1—电缆扎带；2—电缆；3—电缆支架；4—扁钢；
5—吊脚；6—螺栓、螺母

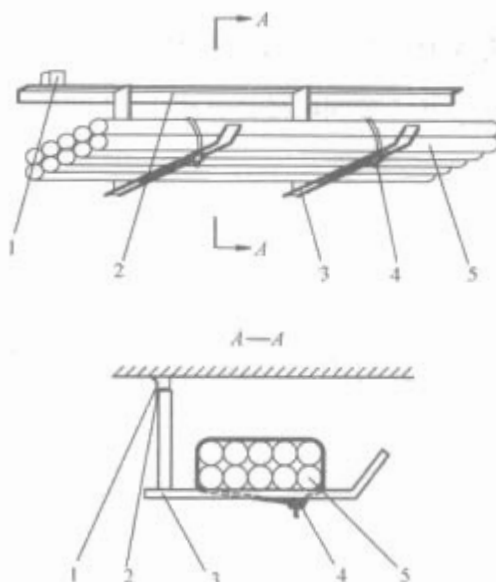


图 10.2-4 用 L 形支架紧固电缆
1—底脚；2—角钢；3—L 形电缆支架；
4—电缆扎带；5—电缆

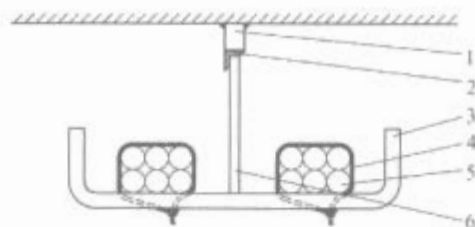


图 10.2-5 用山字形支架紧固电缆
1—底脚；2—角钢；3—山字形支架；
4—电缆扎带；5—电缆；6—钢管

(4) 用扁钢支架紧固电缆，见图 10.2-6。

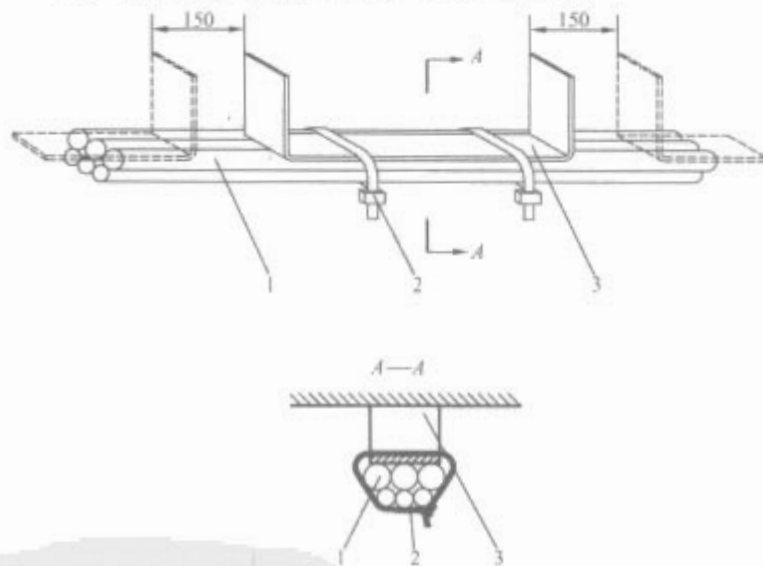


图 10.2-6 用扁钢支架紧固电缆 (mm)
1—电缆；2—电缆扎带；3—扁钢

(5) 电缆固定支架的形式及尺寸按 CB/T 3667.6—1995《船舶电缆敷设和电气设备安装附件电缆敷设支撑件及附件》选用，电缆金属扎带按 CB/T 3496—1992《船用电缆扎带》选用，非金属扎带按 CB/T 3496—1992 选用，包塑金属扎带按 CB/T 3496—1992 选用。

6.3 紧钩紧固电缆的基本形式

(1) 用积木式紧钩紧固电缆，见图 10.2-7。

(2) 用 U 形紧钩紧固电缆，见图 10.2-8。

(3) U 形紧钩和积木式紧钩的形式和尺寸按 CB/T 3667.2—1995《船舶电缆敷设和电气设备安装附件接线件》选用。

6.4 用电线卡子紧固电缆的基本形式

(1) 在桥形板上紧固电缆，见图 10.2-9。

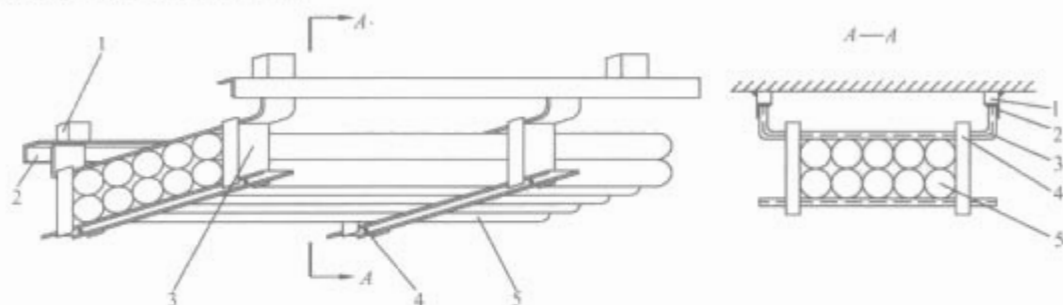


图 10.2-7 用积木式紧钩紧固电缆

1—底脚；2—角钢；3—积木式紧钩；4—螺栓、螺母；5—电缆

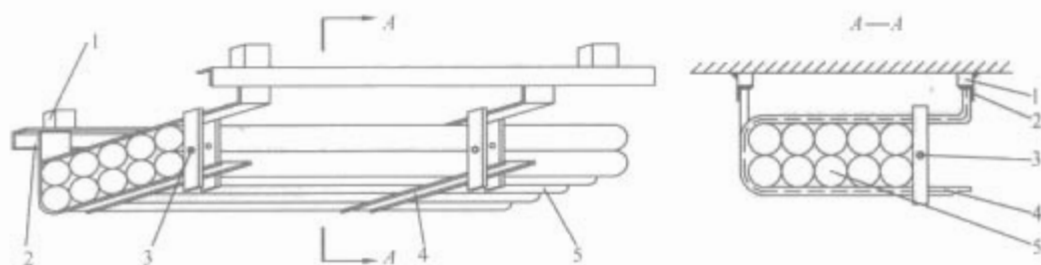


图 10.2-8 用 U 形紧钩紧固电缆

1—底脚；2—角钢；3—螺栓、螺母；4—U 型紧钩；5—电缆

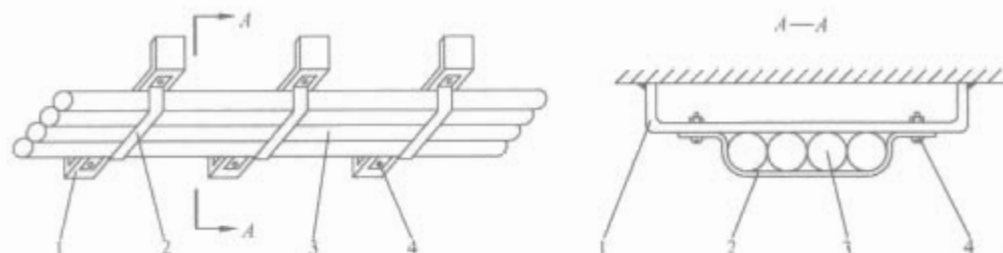


图 10.2-9 在桥形板上紧固电缆

1—桥形板；2—电缆卡子；3—电缆；4—螺钉、螺母

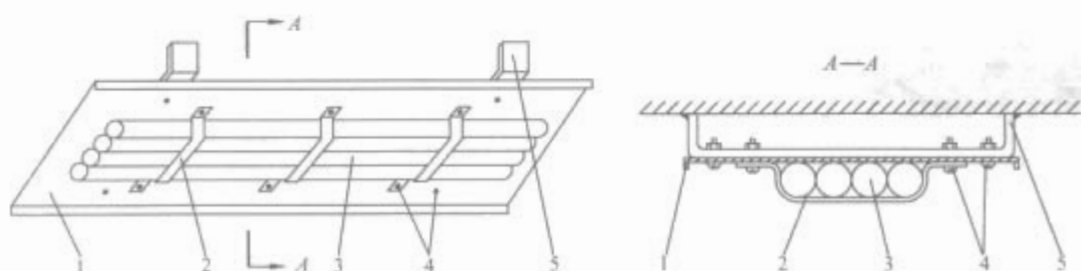


图 10.2-10 在电缆导板上紧固电缆

1—导板；2—电缆卡子；3—电缆；4—螺钉、螺母；5—桥形板

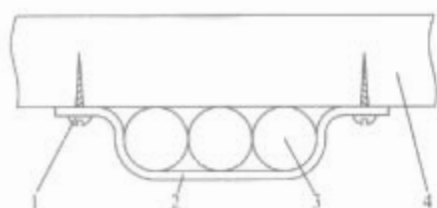


图 10.2-11 在木质封闭板上紧固电缆

1—木螺钉；2—电缆卡子；3—电缆；4—木质封闭板

(4) 桥形板的类型和尺寸按 CB/T 3667.4—1995《船舶电缆敷设和电气设备安装附件 电气设备安装件》选用，电缆卡子的类型和尺寸按 CB/T 3667.6—1995《船舶电缆敷设和电气设备安装附件 电缆敷设支撑件及附件》选用。

6.5 在复合岩棉板或硅酸钙板上紧固电缆的基本形式

(1) 在复合岩棉板或硅酸钙板靠近隔舱钢板（间距 80～200mm）上紧固电缆，一般采用扁钢支架等，并暗线敷设。电缆进入舱室横穿船体构件处应套以衬套保护电缆。电缆穿出封

(2) 在电缆导板上紧固电缆，见图 10.2-10。

(3) 在木质封闭板上紧固电缆，见图 10.2-11。

板处，应加尼龙护线帽，以保护电缆护套不受损伤。

(2) 用复合岩棉板或硅酸钙板作为舱室隔板，板厚约 50mm，电缆通常用暗线敷设，电缆敷设在两板拼接处的空槽内，或穿过板材夹层中的预制孔内。

(3) 用复合岩棉板或硅酸钙板作为舱室隔板，板厚约 20mm，电缆通常采用明线敷设在走线槽板之中。见图 10.2-12。

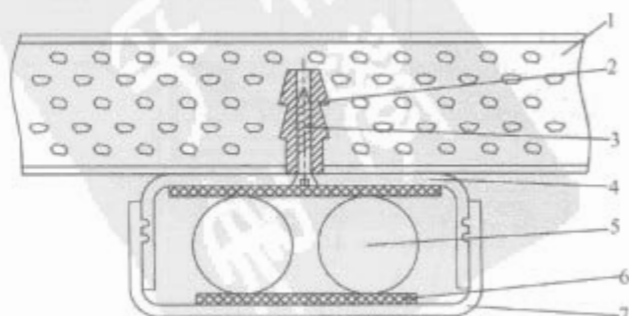


图 10.2-12 电缆采用明线敷设在走线槽板中

1—硅酸钙板；2—内螺纹尼龙预埋件；3—螺钉；4—走线槽底座；5—电缆；6—防松填物；7—走线槽面板

6.6 电缆紧固件的相邻距离要求

电缆紧固件的相邻距离要求按电缆的外径、类型和敷设场所的振动程度合适地选用，一般可按表 10.2-4 的规定来运用。

表 10.2-4	电缆紧固件的间距		mm
电缆外径	电缆紧固件的间距		
	非铠装电缆	铠装电缆	
≤8	200	250	
>8~13	250	300	
>13~20	300	350	
>20~30	350	400	
>30	400	450	

6.7 用扎带紧固电缆的工艺要求

用扎带紧固电缆，除应符合本章第 5.1 条的规定外，还需遵守下列工艺要求。

- (1) 扎带可根据 CB/T 3496—1992 选用。
- (2) 水平敷设的电缆，最宜采用下托敷设形式，即电缆搁置在支架的上方，见图 10.2-13。

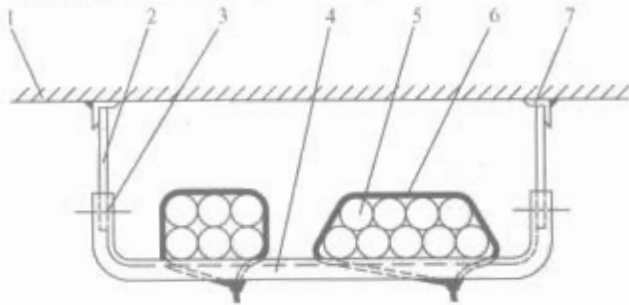


图 10.2-13 下托敷设形式
1—横梁；2—支脚；3—螺栓、螺母；4—电缆支架；
5—电缆；6—电缆扎带；7—角钢

- (3) 水平敷设的电缆，各种支架（包括 U 形、L 形和扁钢）均应尽量避免横向安装。如图 10.2-14 所示，以免在绑扎电缆时造成扎带上端应力集中，容易损坏。

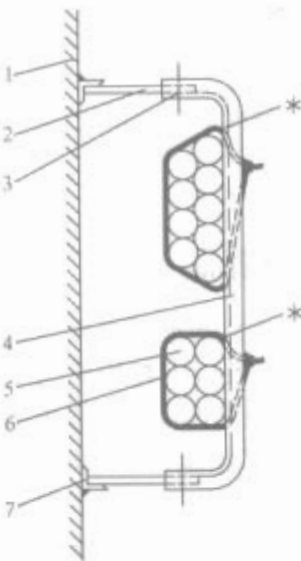


图 10.2-14 支架安装
1—肋骨；2—支脚；3—螺栓、螺母；4—电缆支架；
5—电缆；6—电缆扎带；
7—角钢
* 为应力集中处。

- (4) 在扁钢支架上用扎带紧固电缆，应使最低层的所有电缆与支架均有接触，并尽量使最底层的电缆宽度略大于支架的宽度，以免扁钢的边缘损伤扎带。见图 10.2-15。

- (5) 在重要舱室（如机舱、应急发电机室等）及明线敷设的内外走道，除应采用下托敷设外，一般为直线段，

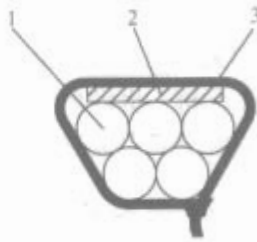


图 10.2-15 在扁钢
支架上用扎带紧固电缆
1—电缆；2—扁钢支架；
3—电缆扎带

每隔五根尼龙扎带，使用一根金属扎带，拐弯处须用金属扎带。

- (6) 用尼龙扎带紧固电缆，扎带不可接长使用。
- (7) 扎带收紧应适当，不应使电缆损伤（宜采用收紧专用工具）。
- (8) 扎带收紧后应在离紧固装置 5~6mm 处切除多余扎带。方向力求一致，以求美观。

7 电缆穿过甲板、舱壁和船体构件

7.1 电缆穿过非水密金属舱壁和船体构件

- (1) 电缆穿过非水密金属舱壁和船体构件时，一般应设置电缆框或衬套，其安装形式见图 10.2-16

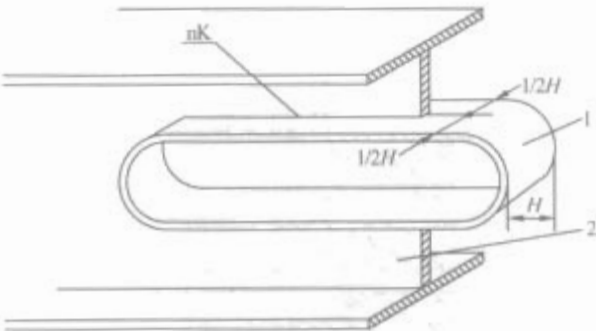


图 10.2-16 设置电缆框的安装形式
1—电缆框；2—船体构件

- (2) 电缆框的形状通常为腰圆形或矩形（四角应为圆角），其截面积较穿通电缆的截面积大 1/3 左右。腰圆形电缆框的形式和尺寸按 CB/T 3667.1—1995 《船舶电缆敷设和电气设备安装附件 电缆贯通装置》选用。电缆衬套的类型和尺寸按 CB/T 3667.1—1995 选用。

- (3) 通过舱壁的开孔或电缆框与电缆束之间的缝隙大于 12mm，应用堵料封堵，防止老鼠出入。

7.2 电缆穿过水密舱壁

- (1) 电缆穿过水密舱壁，单根电缆应设置单根电缆填料函；多根电缆应设置组合电缆填料函，以保持舱壁原有密封性不受影响。

- (2) 填料函中的填料和堵料应采用滞燃、无腐蚀性的材料，在有防火要求的场所，则应采用不燃和无腐蚀性的材料。且填料在施工和填塞后的过程中均不应损伤电缆。

- (3) 水密贯通件密封性能应能承受 0.098MPa 水压，历时 1h 的型式试验而无漏水现象。

- (4) 填料函的类型和尺寸按 CB/T 3667.1—1995 选用。

7.3 水密填料盒的基本形式

- (1) 组合式橡胶块填料盒，见图 10.2-17。
组合式橡胶块填料盒的结构形式，尺寸规格、施工程序和工艺，以及基本技术要求，详见 CB/T 3667.1—1995。

- (2) 水密式 DMT-W 型填料盒见图 10.2-18。DMT-W 型填料盒具有水密、防火性能，其基本技术要求参照 CB/T 3667.1—1995 的规定。

- (3) 填入式环氧树脂填料盒见图 10.2-19。灌注式环氧树脂填料盒的结构形式、填料配方、施工程序和工艺，以及基本技术要求，详见 CB/T 3908—1999 《船舶电缆敷设工艺》（该工艺方法现时船上使用渐少）。

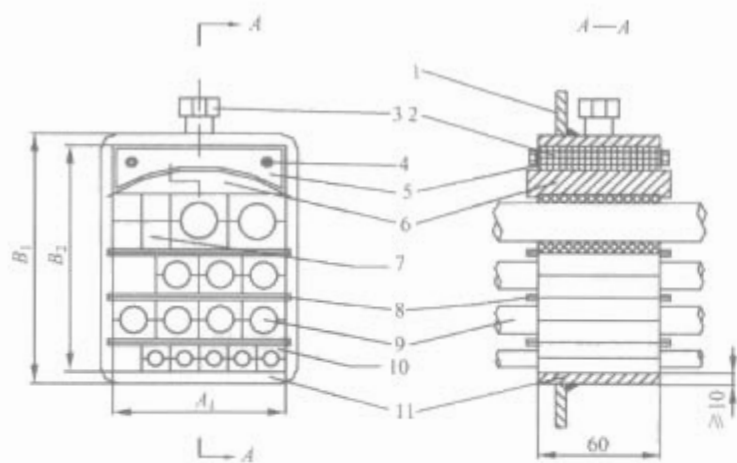


图 10.2-17 组合式橡胶块填料盒 (mm)

1—隔舱壁；2—辅助橡胶块；3—压紧螺栓；4—螺栓、螺母；
5—前、后夹板；6—压块；7—填充橡胶块；8—隔板；9—电缆；
10—橡胶块；11—填料盒壳体

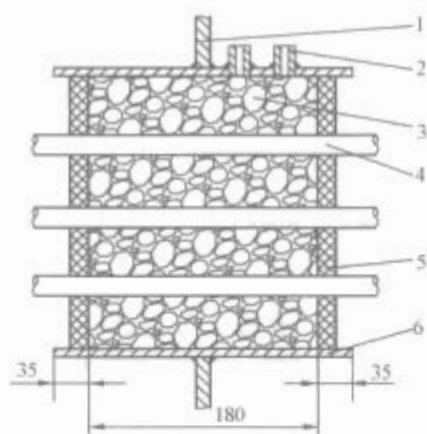


图 10.2-18 水密式 DMT-W 型填料盒 (mm)

1—舱壁；2—浇冒口；3—无机填料；
4—电缆；5—速固填料；6—填料盒本体

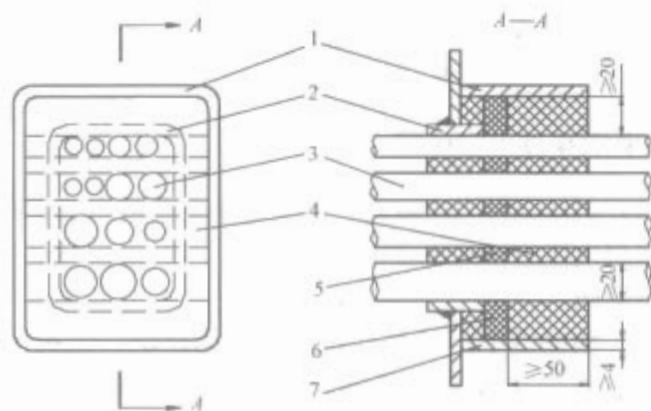


图 10.2-19 填入式环氧树脂填料盒 (mm)

1—填料盒壳体；2—电缆框；3—电缆；4—填料；
5—填充料；6—衬条；7—隔舱壁

7.4 电缆穿过甲板

(1) 电缆穿过甲板应设置电缆管、电缆筒、填料盒或电缆围板。

(2) 安装形式：

1) 电缆筒的安装形式见图 10.2-20，其类型和尺寸按 CB/T 3667.1—1995 选用。

2) 电缆围板的安装形式见图 10.2-21。

3) 电缆框的安装形式、类型和安装尺寸按 CB/T 3667.1—1995 的规定。电缆框在焊接时应伸过甲板 10~20mm。

4) 填料盒的安装形式见本章第 7.3 中 (1)~(3) 的规定。

(3) 安装高度：室内不得低于 200mm；室外不得低于

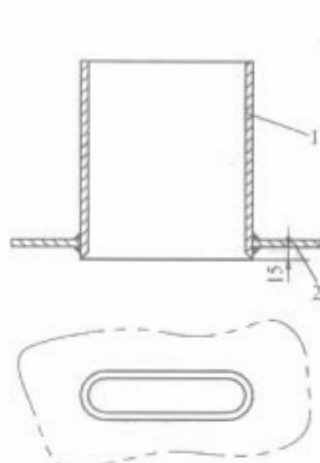


图 10.2-20 电缆筒的安装形式 (mm)

1—电缆筒；2—甲板

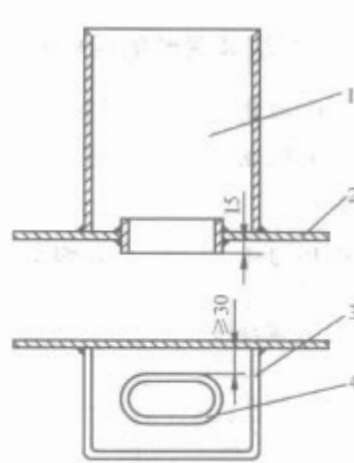


图 10.2-21 电缆围板的安装形式 (mm)

1—围板；2—甲板；
3—舱壁；4—电缆框

400mm。如电气设备的进线孔高度小于上述尺寸时，则可不受此限。

(4) 非水密甲板上的上述安装件，应在端部用填料或堵料堵封。

(5) 水密甲板上的上述安装件，应用填料密封。

(6) 填料或堵料均应在安装件的上端部，且略为凸起，以免积水。

7.5 电缆穿过防火隔堵

(1) 电缆穿过防火隔堵时，应设置电缆防火填料函或填料盒，其防火性能应与电缆所贯穿的舱壁相一致，所有防火贯穿装置均应先经船级社认可。

(2) 电缆穿过舱壁的防火隔堵用 DMT-W 型填料盒，见图 10.2-18。

(3) 电缆穿过甲板的防火隔堵用 DMT-W 型填料盒，见图 10.2-22。

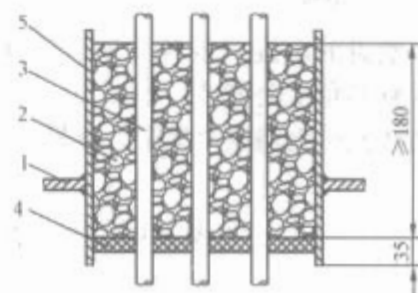


图 10.2-22 电缆穿过甲板的防火隔堵 (mm)

1—甲板；2—无机防火填料；3—电缆；
4—速固堵料；5—填料盒本体

8 限制火焰沿成束电缆传播的措施

在船级社有要求时，电缆应采用成束滞燃性电缆（即通过 GB 9331—1998《额定电压 0.6/1kV 及以下船用电力电缆和电线》规定的有关试验）。当采用单根滞燃性电缆成束敷设时，必须采用阻止火焰沿成束电缆传播的措施；可在电缆表面加涂防火涂料，也可在电缆束上设置挡火隔板。在通过具有防火性能的舱壁或甲板时，应使用具有经船级社认可的填料盒。

8.1 电缆表面加涂防火涂料

电缆敷设后，除单根电缆和穿管敷设外，所有成束电缆其外表面必须涂以经船级社认可的防火涂料。在水平敷设的电缆线路上，每隔 14m 涂覆 1m 长的防火涂料；对垂直敷设的电缆线路上，只需在全部长度上加涂防火涂料。

8.2 电缆束上设置挡火隔板

8.2.1 挡火隔板设置的部位

- (1) 主配电板与应急配电板上。
- (2) 电缆进入主机控制室处。
- (3) 推进机械和重点辅机的集控板上。
- (4) 进入电缆槽处。

8.2.2 在封闭和半封闭的场所,挡火隔板应设置的部位

- (1) 对敷设于全封闭金属围壁的电缆,挡火隔板设于各围壁端点。见图 10.2-23。

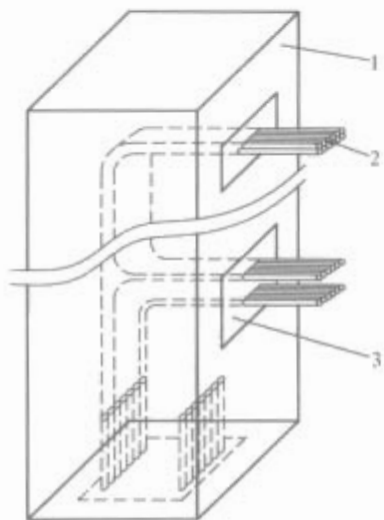


图 10.2-23 挡火隔板设于各围壁端点

1—全封闭的金属围壁; 2—电缆束; 3—挡火隔板

- (2) 对垂直敷设于半封闭场所的电缆,挡火隔板至少设于每隔一层甲板处,但间隔应不超过 6m。见图 10.2-24。

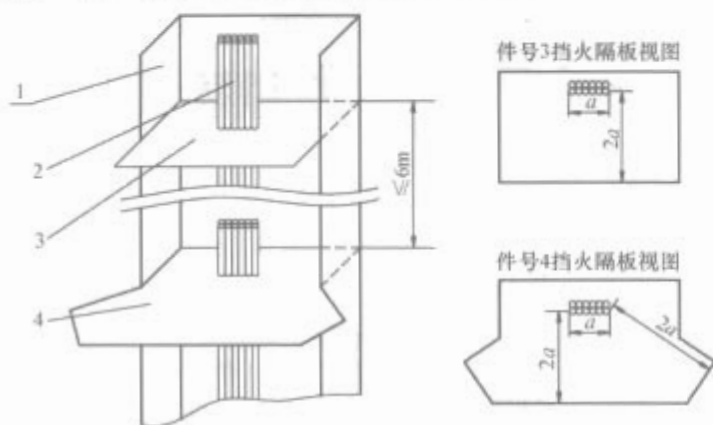


图 10.2-24 挡火隔板设于每隔一层甲板处

1—半封闭的金属围壁; 2—电缆束; 3—挡火隔板; 4—甲板

- (3) 对水平敷设于半封闭场所的电缆,每隔 14m 处设置挡火隔板,见图 10.2-25。

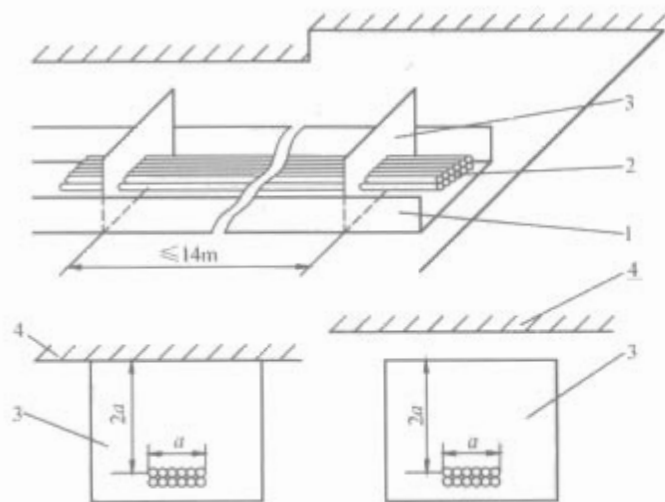


图 10.2-25 每隔 14m 处设置挡火隔板

1—半封闭的金属围壁; 2—电缆束; 3—挡火隔板; 4—甲板

8.2.3 免设挡火隔板的情况

- (1) 如果电缆进入主配电板、应急配电板、推进器械和重要辅机的集控板时,因已采取相应措施,则 8.2.2 中 (1) 和 (3) 条规定的挡火隔板可以免设。

- (2) 在货物区域的货舱及甲板下通道,挡火隔板仅设置于该处所边界处。

8.2.4 挡火隔板的构造

当电缆贯穿装置符合防火 B—0 分隔的要求时,挡火隔板应用厚度至少为 3mm 的钢板制成。挡火隔板应设计成围绕电缆束并延展一定距离,其延展的距离按下述规定确定,但不需延伸穿过天花板、甲板及舱室或围壁的固定边缘。

- (1) 对垂直敷设的电缆,延展距离为电缆束宽度的 2 倍。对在半封闭场所的,见图 10.2-24,对在开敞处所的,见图 10.2-26。

- (2) 对水平敷设的电缆,延展距离为电缆束宽度的 2 倍。对在半封闭场所的,见图 10.2-24,对在开敞处所的见图 10.2-27。

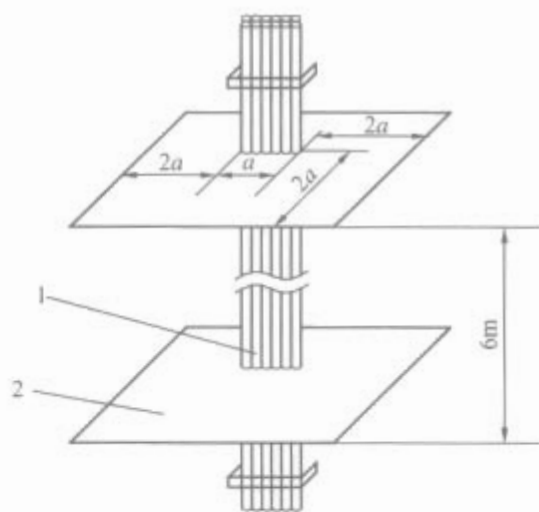


图 10.2-26 开敞处所垂直敷设电缆的延展距离

1—电缆束; 2—挡火隔板

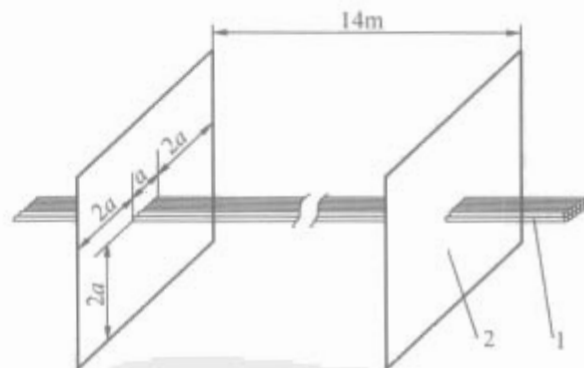


图 10.2-27 开敞处所水平敷设电缆的延展距离

1—电缆束; 2—挡火隔板

9 电缆金属护套接地

- (1) 除工作电压不超过 50V 及具有单点接地要求的电缆外,其他电缆金属护套均应两端可靠接地。但最后分支电路的电缆金属护套,允许仅在近电源一端可靠接地。对于控制仪表和设备的电缆可按其技术要求单点接地。电气系统接地示意图见图 10.2-28。

- (2) 电缆金属护套应保证有电气的连续性。

- (3) 电缆金属护套接地的形式

- 1) 用金属夹箍进行接地,多根电缆接地见图 10.2-29,单根电缆接地见图 10.2-30。

多根电缆接地夹箍可用船用金属扎带,按 CB/T 3496—1992 选用;单根电缆接地可用夹箍按 GJB 1046—1990 选用。

- 2) 用铜丝编织成辫子进行接地, 见图 10.2-31。
- 3) 用金属填料函螺母压紧电缆金属护套进行接地, 见图 10.2-32。

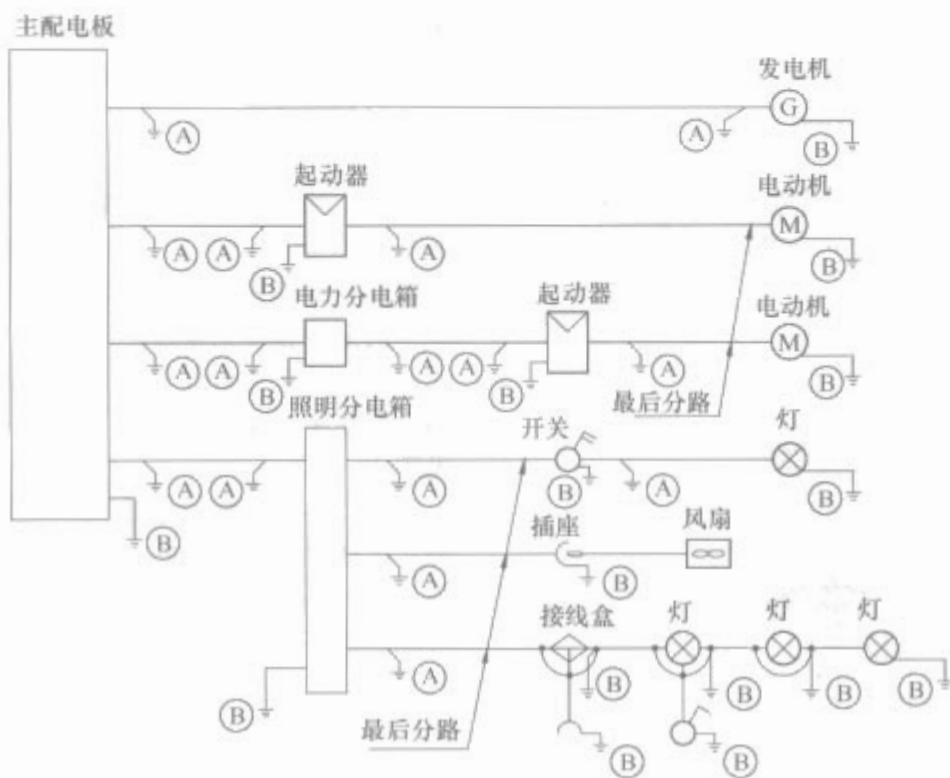


图 10.2-28 电气系统接地示意图

— 接地线的连接；A—电缆接地；B—电气设备接地

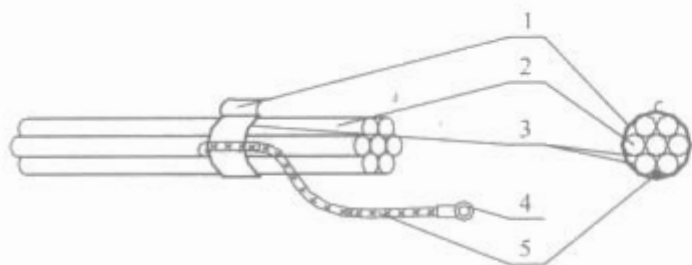


图 10.2-29 多根电缆接地

1—金属夹箍；2—电缆；3—锡箔；4—电缆接头；5—接地导体

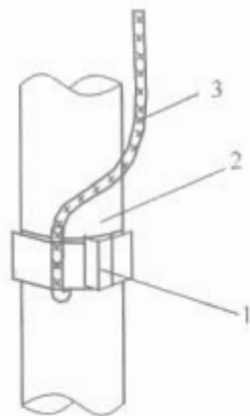


图 10.2-30 单根电缆接地

1—金属夹箍；2—电缆；3—锡箔

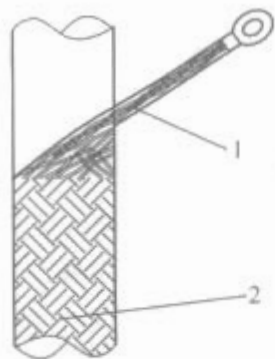


图 10.2-31 用铜丝编织成辫子进行接地

1—铜丝辫子；2—电缆

4) 用电缆卡子或紧钩压紧电缆金属护套进行接地, 见图 10.2-33 和图 10.2-34。

(4) 电缆金属护套接地。

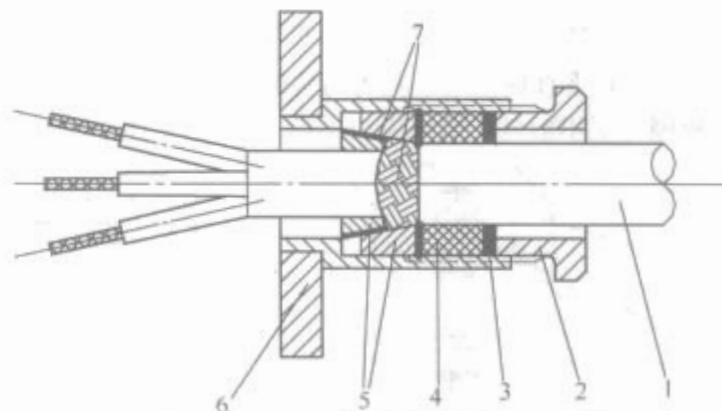


图 10.2-32 用金属填料函螺母压紧电缆金属护套进行接地

1—电缆；2—填料函螺母；3—垫圈；4—填料；5—锥形垫圈；6—填料函座；7—电缆金属编织

注：图中电缆金属编织护套被两个锥形垫圈（截面为梯形）夹紧，并通过锥形垫圈与填料函本体紧密接触

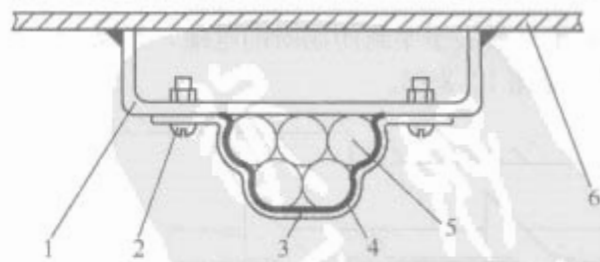


图 10.2-33 用电缆卡子压紧电缆金属护套进行接地

1—电缆支架；2—螺钉、螺母；3—电缆卡子；4—锡箔；5—电缆；6—船体

1) 接地导体应由纯铜或其他抗腐蚀金属制成。其他材料的接地导体的电导, 应不小于纯铜接地导体的电导。接地导体的截面积应符合表 10.2-5 的规定, 成束电缆如采用公共接地导体接地, 则该接地导体的截面应按该束电缆中最大载流导体的截面选择。

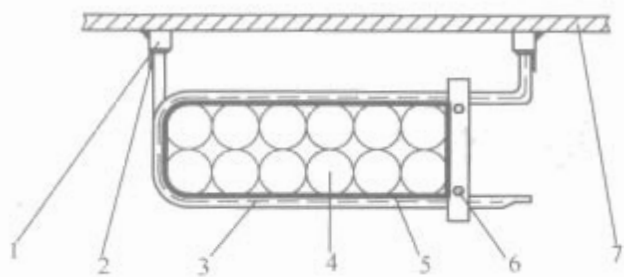


图 10.2-34 用紧钩压紧电缆金属护套进行接地
1—底脚；2—角钢；3—紧钩；4—电缆；
5—锡箔；6—螺栓、螺母；7—船体

表 10.2-5 接地导体截面积的确定 mm²

电缆导体截面积	专用接地铜导体截面积
≤25	≥1.5
>25	≥4

2) 接地的工艺要求。

a. 接地导体应接到船体永久结构或与船体相焊接的基座、支架上，亦可接至已可靠接地的设备的金属填料函或外壳上的专用接地螺钉（栓）处。

b. 专用接地螺柱，应设在不易受到机械损伤和有油、水浸渍的地方，用黄铜或其他耐腐蚀材料制成，直径应不小于 M4。

c. 金属护套与接地导体的接触面处，应除去油漆及金属氧化层，并在两者之间，垫以厚度不小于 0.5mm 的锡箔或镀锡铜片，也可垫以镀锡铜丝编织，以保证有良好的接触。

d. 对接地导体与接地螺柱连接的一端，其两侧应垫以镀锡（镍）铜垫圈，并应设有防止松脱的弹簧垫圈或螺母。

e. 接地装置紧固后，应随即在接地处四周以防锈油漆涂封。

10 电缆贯通密封

10.1 对电缆贯通密封工艺要求

按船舶建造规范要求，凡是电缆贯穿水密隔舱壁均不能损害舱壁原有的密封性。所以应对电缆贯通件采取密封措施。如单根电缆贯穿可选用电缆填料函，多根电缆可采用电缆盒（含电缆筒、电缆框），它的结构应能保证在通过电缆和充填填料后，能满足其隔舱壁的应承受的密封要求。

10.2 对填料盒密封性要求

填料盒的结构形式可有多种，它根据可承受的密封性要求和选用的填料不同而有所差异。但必须能保证隔舱壁的原

10.3 对填料函的技术要求

- (1) 环境空气温度为 -25℃~45℃。
- (2) 空气相对湿度 ≥95%，并有凝露，有盐雾，油雾和霉菌。
- (3) 周期横摇 ±45°，横摇周期 3~14s。

短时性纵倾 ±30°，各 3min，持续性横倾 ±15°，有冲击振动。

(4) 对电缆无腐蚀性、无毒性，有耐燃性、有良好的密封性。而且施工安全方便。

10.4 电缆贯通密封工艺方法

(1) 密封前准备工作。

1) 在电缆敷设前应认真检查电缆和贯穿装置是否符合施工图纸和工艺要求。

2) 检查密封材料（填料）的出厂质量证明。

3) 对贯通件的内壁进行除锈、涂漆等清洁工作。

4) 检查贯通件内壁和电缆贯穿孔是否有锐边或毛刺，以免损伤电缆。

(2) 密封方法。

1) 组合式橡胶块填料盒（MCT）。利用组合式结构，将橡胶块根据电缆外径尺寸分成上下各一半配制。按序排列，逐一组装，然后利用压紧螺栓攻紧，压缩橡胶块，达到密封的目的（详见 CB/T 3667.1—1995）。

2) 灌注法（如 S950 和 J980 型填料）。将具有一定浓度的液体填料，直接或通过灌注装置灌注进密封体内，充满密封件的空间，利用填料自然固化的特性，从而达到密封的目的。

3) 堵塞法（如 601 型填料）。将填料塞入密封件内，堵塞所有空隙，加以一定的压力，达到密封的目的。

4) 混合法。将填料的黏性和压紧力结合应用，使填料充分塞填在密封件内，达到密封的目的。

以上各种密封工艺方法选用都取决于所选用的填料性能，而选用填料的依据是船上所用密封装置的要求而定。各有利弊，合理选用。但是近几年来国内外的造船较多地选用灌注法和组合式橡胶块填料配用合适的结构形式，施工方便，密封性效果较好。

11 检验规则

- (1) 电缆敷设的线路及工艺措施应符合工艺要求。
 - (2) 电缆紧固的质量和应符合工艺规定。
 - (3) 电缆弯曲半径应符合表 10.2-3 的规定。
 - (4) 电缆穿过甲板或舱壁的保护和密封性应符合本章第 4.1 条的规定。
 - (5) 电缆在管子内敷设应符合本章第 4.1 条的规定。
 - (6) 电缆金属护套的接地应良好有效，接地电阻应不大于 0.02Ω。
 - (7) 电缆护套应无损伤。
 - (8) 电缆芯线应无损伤。
 - (9) 电缆贯穿件的密封性应达到工艺要求。
- 电缆盒密封三天后才能进行密封性检验。可在距电缆盒 100mm 处，用直径为 12mm 软管通以 0.4MPa 的压缩空气重点喷射电缆盒表面，而在电缆盒的另一侧涂以一定浓度的肥皂水，缓慢移动喷嘴，使整个密封表面均受到气流冲击。应反复进行 2~3 次，以涂肥皂水的侧面未出现肥皂泡，可判为密封性合格。

第 3 章 船舶电磁兼容工艺

1 概述

1.1 船舶电磁兼容工艺特点

舰船电磁兼容性是现代舰船重要性能指标，舰船电磁兼容性越来越受到人们的重视和关注。舰船良好的电磁兼容性可确保武器和电子设备互相不产生电磁干扰而稳定可靠地工作，发挥应有的功能。相反，如果舰船在设计、建造时电磁兼容性能处理得不好，不仅极易造成系统与系统、系统与设备互相干扰，而且强电磁场还会电引爆武器爆炸，引燃低闪点燃油，伤害人体，产生严重后果。

舰船电磁兼容工艺技术是一个既重要又复杂的问题，它涉及面很广，涉及船体、舾装、机装、电装几个专业。施工工艺又十分繁琐复杂。如果在舰船建造时，对电磁兼容工艺技术不重视，又不认真解决关键技术，严格把关，待舰船建造结束进行系泊试验和航行试验时发现电磁干扰，不仅造成返工，费工费时，而且问题不易解决。

即使与高频电磁波无直接关系的舰船机械设备、舾装部件和索具，包括导弹发射架、回转起重机等，也会因处于高频电磁场中产生高电压，危及人身安全，或感应产生高频电流，通过不良接触点的非线性效应，造成无线电干扰。高频电磁场强大到一定程度，还会引爆以电起爆的武器引信和电爆管，引燃低闪点燃油，伤害人体，产生甚为严重的后果。

舰船上可靠而有效的接地是非常重要的。
舰船电磁兼容性取决于四个环节：①舰船总体设计；②装舰设备上舰前进行的电磁兼容性能测试是否满足装舰要求；③船厂建造工艺；④使用方的电磁兼容管理和控制。

在舰船建造阶段，船厂应开展和加强舰船电磁兼容性工艺技术研究，其中包括接地和搭接技术、屏蔽技术、滤波技术和绝缘技术，对于提高施工质量，减少和消除电磁干扰，改善舰船电磁兼容性能有十分重要的意义。

1.2 说明

(1) 对于不同用途的舰船应制定相应的电磁兼容施工工艺文件。按用途分，船舶有军船和民船之分，民船有货船、油船、化学品船、旅游船等，不同用途的船舶，对于电磁兼容工艺有不同的要求。其中军舰的电磁兼容性最为重要，对电磁兼容工艺要求也最高。随着舰船电磁兼容环境的更复杂更严峻，在舰船建造中对于电磁兼容工艺要求越来越高，施工难度也越来越大，为了把电磁干扰降到最低限度，必须不断研究新材料、新工艺，不断提高施工可操作性，改善舰船电磁兼容性能。

(2) 做好电磁兼容性的宣传和培训工作。由于电磁兼容工作涉及范围广，它与电装、舾装、船体、涂装等专业都有关；它的工作量大、繁琐复杂，返工困难，在施工中不注意或有遗漏都会影响电磁兼容效果，因此必须使管理人员、技术人员和工人都能了解什么是电磁兼容，从思想上真正认识到电磁兼容的重要性，在实施过程中应注意哪些问题，这是提高电磁兼容性的基础。

在船舶建造中，应有专人负责电磁兼容工艺工作，负责各专业之间协调平衡，并将电磁兼容工艺分解落实到各专业施工图纸中。

(3) 屏蔽舱室屏蔽效果和接地有效性是电磁兼容实施工艺的关键，数以千计的电缆、管路、风管贯穿屏蔽舱室，每根电缆都相当于一根馈线（或天线），将屏蔽舱室屏蔽效能降低，所以严格地讲，舰船上的屏蔽舱室并不是真正的屏蔽舱室，而是采取了屏蔽措施的舱室，因此要提高屏蔽舱室的屏蔽效果是一个既重要又十分艰巨的任务。

接地有工作接地、机壳保护接地、高频接地、信号地等多种接地形式，接地是消除电磁干扰最简单有效的办法，但不同场合用不同方法，接地效果不尽相同，甚至有些地方因不恰当的接地反而会引起干扰。因此研究新材料、新工艺提高接地效果也是电磁兼容实施工艺的关键问题。

2 工艺准备

- (1) 熟悉有关的电磁兼容规范、标准。
- (2) 熟悉有关图纸和文件。
- (3) 编制电磁兼容原则工艺或电磁兼容实施工艺。
- (4) 根据有关图纸和文件的要求，选择和准备合适的足够数量的安装材料。

包括以下安装材料：接地铜带、接地板、搭接条、电缆筒、电缆管、电缆贯穿装置，管路贯穿装置、接地螺柱、屏蔽网、屏蔽铜箔、锡箔纸、酒精等。

- (5) 准备测试仪器仪表，如毫欧表或微欧表、电阻计等。

3 搭接和接地工艺

3.1 搭接

3.1.1 搭接分类

A 类搭接 —— 两金属表面通过熔焊或铜焊方法实现的连接。

B 类搭接 —— 设备壳体、基座或机柜与船体地之间通过螺钉连接方法实现的连接。

C 类搭接 —— 两金属表面借助金属搭接条建立的连接。

3.1.2 搭接条的分类

3.1.2.1 I 型搭接条与选择

在舰船露天区域内，对易产生互调干扰的金属构件或不能使用 A 类、B 类搭接的设备使用 I 型搭接条，见表 10.3-1、图 10.3-1。

表 10.3-1 I、II 型搭接条		mm	
型号	材料	L	φ
I 型	铜质端头、铜绞线	150, 200,	—
II 型	铜质端头、冷压接头、铜绞线	250, 300, 350	6, 8

3.1.2.2 III 型搭接条

舰船上对产生电磁干扰的设备和构件，如天线调谐器或

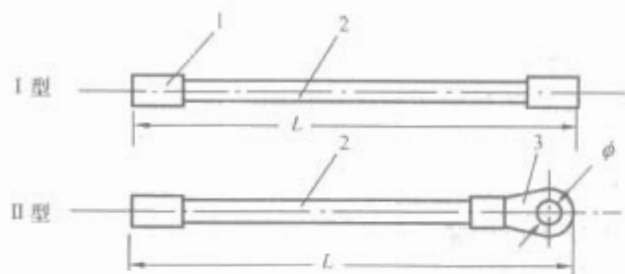


图 10.3-1 I、II 型搭接条

1—铜质端头；2—电缆或铜绞线；3—冷压电线的接头

耦合器、设备、机壳、机柜等使用 III 型搭接条，见表 10.3-2、图 10.3-2。

表 10.3-2 III 型 搭 接 条 mm

材料	L	B	ϕ
黄铜片 (镀锡) 厚 1mm	160	30	17, 15, 12.5, 10.5
	120	20	8.5
	80	20	6.2
	60	10	4.2

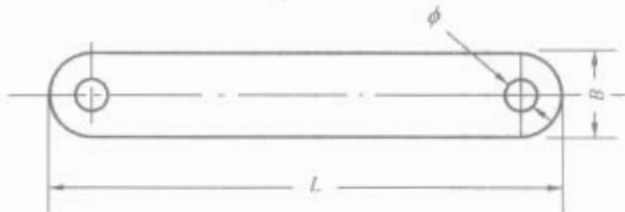


图 10.3-2 III 型搭接条

3.1.2.3 IV 型搭接条

在舰船非露天区域内，对需隔声、减震的设备，一般采用 IV 型搭接条，见表 10.3-3、图 10.3-3。

表 10.3-3 IV 型搭接条外形尺寸

多股软铜 绞线	L (mm)	ϕ (mm)	外护套颜色	铜接头	热塑套管
35mm ²	350	10	黄绿标准色	JGK 35-10	RSFI 14/8
			灰色		
	300	8	黄绿标准色	JGK 35-8	RSFI 11/8
			灰色		
25mm ²	200	8	黄绿标准色	JGK 25-8	RSFI 11/8
			灰色		
		6	黄绿标准色	JGK 35-6	RSFI 11/8
			灰色		
	250	8	黄绿标准色	JGK 25-8	RSFI 14/8
			灰色		
		6	黄绿标准色	JGK 35-6	RSFI 11/8
			灰色		
	300	8	黄绿标准色	JGK 25-8	RSFI 14/8
			灰色		
		6	黄绿标准色	JGK 25-6	RSFI 11/8
			灰色		

续表					
多股软铜 绞线	L (mm)	ϕ (mm)	外护套颜色	铜接头	热塑套管
10mm ²	200	6	黄绿标准色	JB 10-6	RSFI 9/5
			灰色		
	250	6	黄绿标准色	JB 10-6	RSFI 9/5
			灰色		
	300	6	黄绿标准色	JB 10-6	RSFI 9/5
			灰色		

注 1. ϕ 为螺栓外径。
2. 多股软铜绞线为镀锡铜丝，每股面积 0.2mm²。
3. 表中热塑套管型号为长春热塑材料股份有限公司生产。套管颜色可选用绿色和灰色。

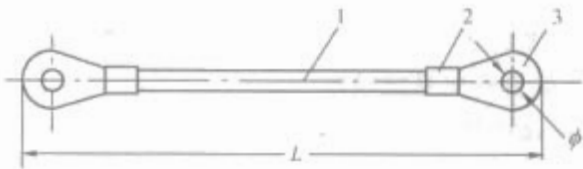


图 10.3-3 IV 型搭接条

1—多股软铜绞线，PVC 外套；2—热塑套管；3—冷压接头

3.1.3 搭接条安装

(1) 安装搭接条之前，应对金属构件的接触面进行处理，处理后的接触面应平整、清洁，无油漆、油脂和氧化物，并应露出金属光泽，处理面积应大于垫圈面积的 1.5 倍，经处理的接触面应在 24h 内安装完毕。

(2) 搭接条应安装在便于检查及更换的位置。

(3) 搭接安装后两金属接触面应有足够的压力，不应受舰船正常运动产生的振动、膨胀、收缩或相对运动的影响，而造成搭接条的松动或断裂。

(4) 搭接接触面应垫多层锡箔纸，其厚度不小于 0.5mm。

(5) 搭接条的紧固螺栓直径，一般为 6mm、8mm 或 10mm。

(6) 搭接面及连接件应尽量涂复导电防腐剂。

(7) 搭接条安装结束后，应尽快对搭接点进行水密封处理，不同场合可选择不同方法，如使用电缆膏硫化密封胶、热缩套管或涂复防锈漆等。

3.2 搭接和接地工艺要求

3.2.1 设备机壳接地

(1) 对于供电电压为：交流大于 36V、直流大于 42V 的所有电气、电子设备的金属壳体均应采用 C 类搭接方法，使用 III 型或 IV 型搭接条，按 GJB 4000—2000《舰船通用规范》有关规定施工。

(2) 对于移动、滑动或转动的设备，应使用电源电缆内芯线接地或选用软电缆接地，但其芯线截面积应等于或大于设备供电电缆芯线截面积，电源插座应有接地插孔。

(3) 厨房、洗衣室、厕所等潮湿舱室内的电气设备，即使安装在钢制机座上，也要用搭接条做有效接地。

(4) 对安装在露天区域及安装在舱室围壁或桌上的电气、电子设备的接地，应就近在舰体上焊接附座，并用搭接条做有效接地。

3.2.2 计算机系统信号地接地

(1) 凡有信息传输的计算机系统及设备应设置专用的接地系统。

(2) 设备机壳地和信号地应分开, 信号地应同机壳绝缘。

(3) 计算机信号地接地系统, 应按 CB/Z 132—1998《舰船电气设备和电缆屏蔽接地工艺》有关规定施工。

3.2.3 通信系统高频接地

(1) 通信系统的发射机和接收机应使用接地铜带与接地板连接, 其接地铜带截面积按设备的功率及频率而定。一般发射机用接地铜带为厚 0.5mm、宽 50~150mm, 接收机用接地铜带为厚 0.2mm、宽 50mm, 接地板按 CB/T 3667.3—1995《船舶电缆敷设和电气设备安装附件 接地件》规定选用。

(2) 接地板安装位置应尽量靠近发射机, 接地铜带长度应尽量短, 发射机应使用独立的接地铜带和接地板。

(3) 接地铜带应镀锌, 接地板及附件应镀锌。

(4) 接地板应可拆卸, 当接地板安装在围壁内时, 应在接地板前装有可拆盖或活络门, 便于维护和检修。

(5) 天线调谐器或耦合器必须采用Ⅲ型搭接条接地。

3.2.4 舰载直升机系统接地

(1) 舰载直升机在起降平台或机库维护、加油及直升机空中悬停垂直补给、加油等作业时必须安全接地。

(2) 在机库出油口、入油口各安装一个接地装置, 接地装置和直升机之间专用搭接线连接。直升机在作业期间必须始终连续接地。

(3) 直升机在舰面悬停作业和悬停加油时, 必须通过专用搭接线接地, 一端接在接地装置底座上, 另一端通过高压静电放电棒同直升机吊缆连接。

3.2.5 电缆屏蔽层接地

(1) 屏蔽电缆必须保持良好的屏蔽连续性。

(2) 传输低频低电平信号的屏蔽层应单点接地, 一般应在传感器一端接地。传感器不接地时, 屏蔽层应在信息处理机端接地。

(3) 短波发射机采用同轴电缆作为天线馈线时, 同轴电缆的屏蔽层原则上应多点接地, 其间隔应小于 2.5m。

(4) 屏蔽的电力电缆, 信号电缆及射频同轴电缆的屏蔽至少应在电缆两端接地。

(5) 贯穿甲板、舱壁进入露天部位的所有屏蔽电缆, 应尽可能采取屏蔽接地措施。

3.2.6 电缆管、波导管等金属管道接地

(1) 电缆管必须保持良好的屏蔽连续性, 并在舱壁贯穿处周边接地。

(2) 各种金属管路在贯穿甲板或舱壁通向露天部位或进入屏蔽舱室时, 在贯穿处必须 360°周边接地或通过法兰接地。

(3) 各种金属管路在露天部位均需保持电气上连续可靠连接, 凡活动处及管接头处均要搭接条跨接。每根管路长度大于 3m 时, 应在距端部不大于 1.5m 处接地, 小于 3m 时沿着管路的途中任何一点接地。

(4) 对于铜镍铁合金管、紫铜管在外场焊接附座有困难的管路, 可采用金属夹箍形式接地。

(5) 涡轮机排气管应使用四根搭接条间隔 90°接地, 柴油机排气管应使用两根搭接条间隔 180°接地。

3.2.7 舱面舾装设备和索具接地

(1) 露天部位的各种设备和金属构件(吊杆、火炮、导弹发射架、栏杆及各种金属索具, 必须可靠接地, 应按有关安装图进行施工)。

(2) 舱面上设置的各种金属柜、箱的外壳应与船体可靠接地, 金属柜、箱的门应用搭接条接地。

(3) 导弹发射架、火炮、干扰弹发射架、输弹机等舱面

上的武器装备应用软电缆接地。

3.2.8 铝合金舱壁接地

铝合金舱壁与钢质舱壁铆接时, 接触面间垫防腐多硫橡胶带, 铝合金舱壁与钢质板壁之间应使用搭接条连接, 搭接条间隔为 1.5m。搭接时可在钢质围壁焊接钢质附座, 在铝合金舱壁上可用紧固件连接, 接触面间垫锡箔片。

3.2.9 铆钉舱壁接地

船体上层建筑钢质轻围壁用铆钉连接处, 在铆接段每隔 1m 点焊 10mm, 保证接地连续性。

3.3 搭接和接地工艺方法

3.3.1 设备接地方法

电气设备保护接地的基本形式分为四种: 用底脚接地、用接地柱和专用接地导体接地、用接地跨接片接地及固定在围壁板上的设备用接地柱接地。

(1) 用底脚接地, 见图 10.3-4。

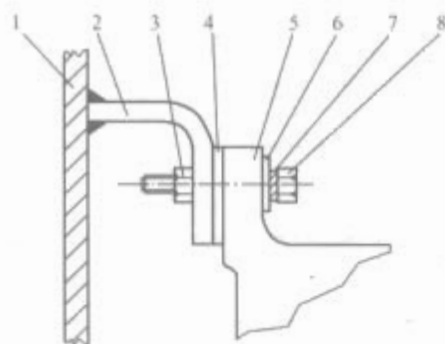


图 10.3-4 用底脚接地

1—舰体或金属构件；2—支架；3—螺母；
4—锡箔（或梅花垫圈）；5—设备底脚；6—平垫圈；
7—弹簧垫圈；8—螺栓

(2) 用接地柱、专用接地导体接地, 见图 10.3-5。

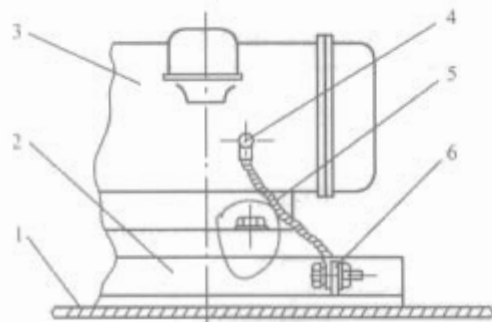


图 10.3-5 用接地柱、专用接地导体接地

1—甲板；2—设备底座；3—电动机；4—接地柱；
5—专用接地导体；6—接地板

(3) 用接地跨接片接地, 见图 10.3-6、图 10.3-7。

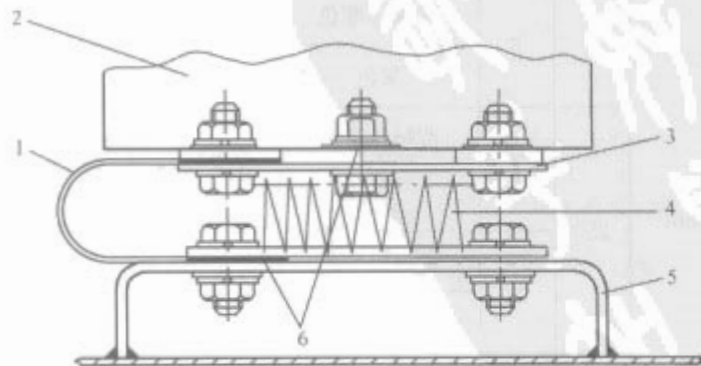


图 10.3-6 用接地跨接片接地

1—接地跨接片；2—设备；3—安装板；
4—弹簧减震器；5—支架；6—锡箔

(4) 固定在围壁板上的设备接地, 见图 10.3-8。

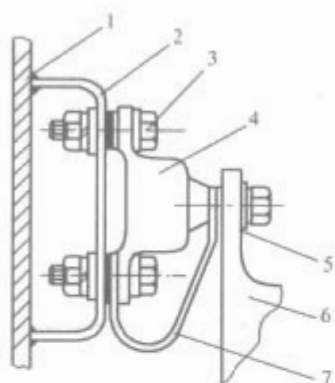


图 10.3-7 接地跨接片接地

1—舰体或金属构件；2—支架或基座；3—螺栓、螺母、平垫圈和弹簧垫圈；4—保护式减震器；5—锡箔；6—设备底脚；7—接地跨接片

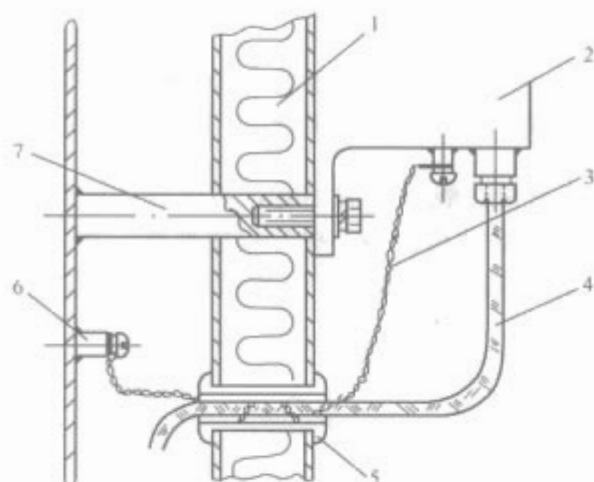


图 10.3-8 固定在围壁板上的设备接地

1—围壁板；2—电气设备；3—接地导体；4—电缆；5—电缆衬套；6—接地柱；7—套筒支柱

3.3.2 信号地接地方法

(1) 计算机信号地接地系统由主接地缆、分支接地缆、接线装置和接地柱组成，接线装置由基座板、地板和压板组成，见图 10.3-9。

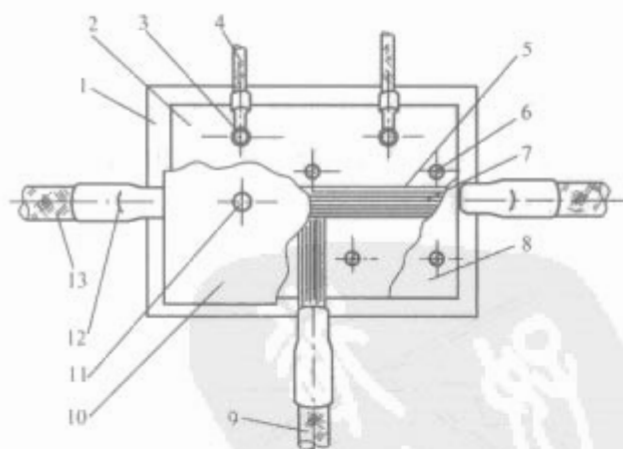


图 10.3-9 计算机信号地接地系统

1—绝缘底板；2—基座铜板；3—分支接地螺钉；4—分支接地缆；5—熔锡；6—基座压板螺柱；7—电缆裸铜丝；8—基座压板；9—接地短缆；10—罩壳；11—灌注孔；12—热缩护套；13—主接地缆

(2) 接线装置与船体为绝缘安装，其底板采用环氧玻璃布层压板，经底板四孔用螺栓与附座相连接，附座焊接于船体上。

(3) 分支接地缆与接线装置和设备信号地接线柱的连接。

(4) 接地柱与船体的连接，将接地柱环焊于舰体上。

(5) 主接地电缆与接线装置的连接。

(6) 接地短电缆与接地柱的连接。

3.3.3 电缆屏蔽层接地方法

(1) 单屏蔽电缆的屏蔽接地。

1) 用不锈钢扎带进行接地，见图 10.3-10。

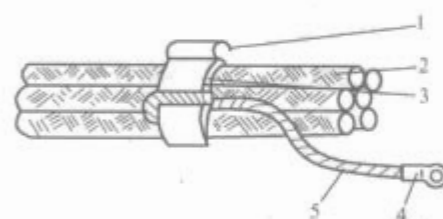


图 10.3-10 不锈钢扎带接地

1—不锈钢扎带；2—电缆；3—锡箔纸；4—电缆接头；5—搭接条

2) 电缆铜丝编织套接地，见图 10.3-11。

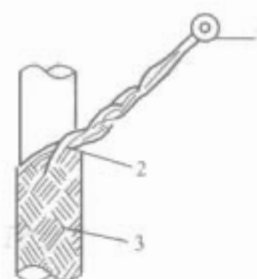


图 10.3-11 电缆铜丝编织套接地

1—电缆接头；2—铜丝编织套；3—电缆

3) 电缆接地填料函接地，见图 10.3-12。

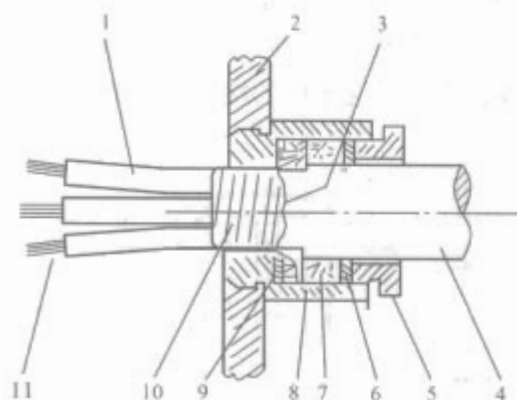


图 10.3-12 电缆接地填料函接地

1—电缆橡胶护套；2—设备箱壁；3—电缆金属编织护套；4—电缆；5—填料螺帽；6—平垫圈；7—填料；8—填料底座；9—锥形垫圈；10—聚氯乙烯胶带；11—电缆线芯

(2) 双屏蔽电缆的屏蔽层接地。

1) 在剥去编织护套及橡胶护套的电缆端部，包基层锡箔纸，再用镀锡细铜丝扎紧，然后把细铜丝的一端焊在电缆外屏蔽层上，焊区距离编织套边缘至少 4~5mm，另一端接到接地柱，见图 10.3-13。

2) 用聚氯乙烯带把扎线部分和焊接部分包扎。

(3) 同轴电缆的屏蔽层接地。

1) 电缆端头按需要切割后，把屏蔽层铜丝拆散。

2) 拆散的铜丝焊接或压接在高频插头内部的垫圈上，再剪去多余的铜丝。

3) 焊接或压接芯线，拧紧螺母，见图 10.3-14。

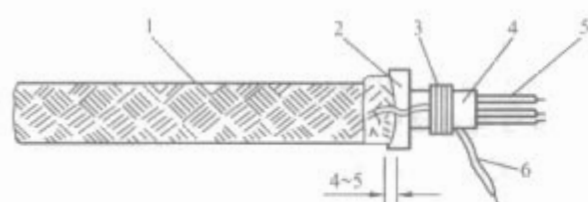


图 10.3-13 双屏蔽电缆的屏蔽层接地
1—电缆；2—聚氯乙稀胶带；3—细铜丝；4—锡箔纸；
5—内屏蔽层；6—细铜丝接地端

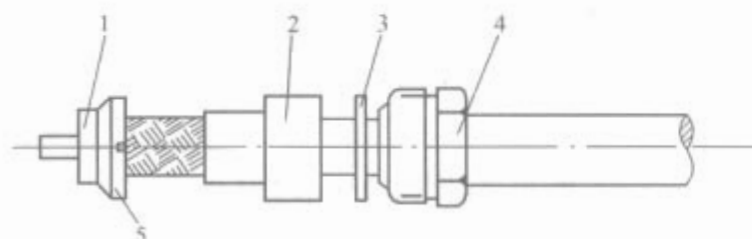


图 10.3-14 同轴电缆屏蔽层接地
1—钎焊；2—橡皮环；3—垫圈；4—螺母；5—内垫圈

3.3.4 金属管路接地

(1) 螺纹接头通舱件的接地，见图 10.3-15。

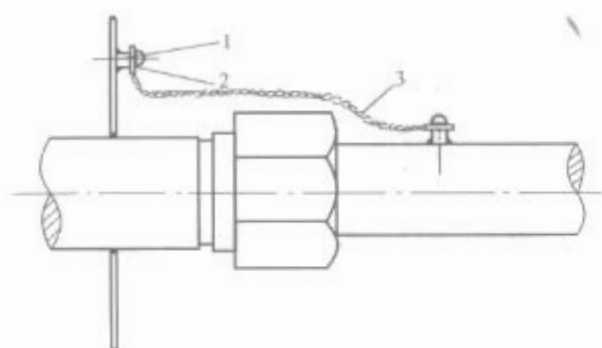


图 10.3-15 螺纹接头通舱件的接地
1—附座；2—锡箔纸；3—搭接条

(2) 铜镍铁合金管通舱件的接地，见图 10.3-16。

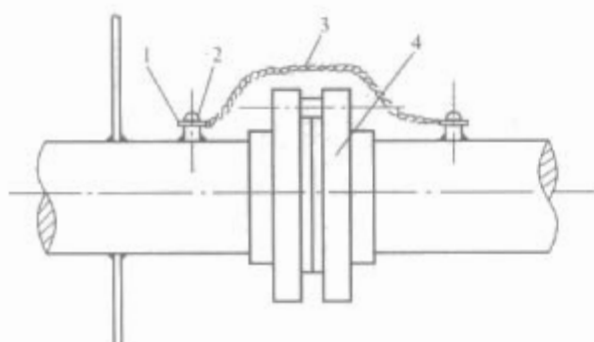


图 10.3-16 铜镍铁合金管通舱件的接地
1—附座；2—锡箔纸；3—搭接条；4—松套法兰

(3) 钢法兰接头通舱件的接地，见图 10.3-17。

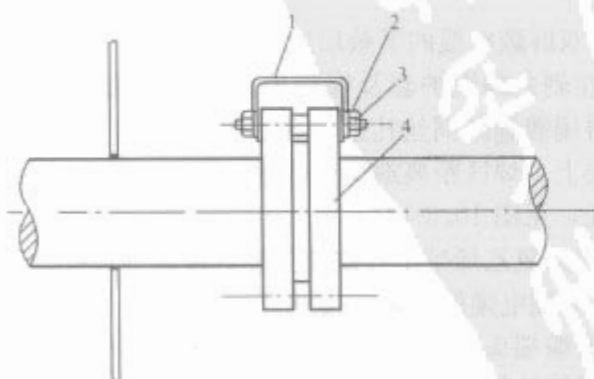


图 10.3-17 钢法兰接头通舱件的接地
1—搭接条；2—锡箔纸；3—连接螺钉和螺母；4—法兰

3.3.5 舰载直升机接地

(1) 舰载直升机在起降平台或机库停放、维修和地勤作业时，将专用接地线一端夹在接地装置上，另一端接地插头插至直升机接地，见图 10.3-18。

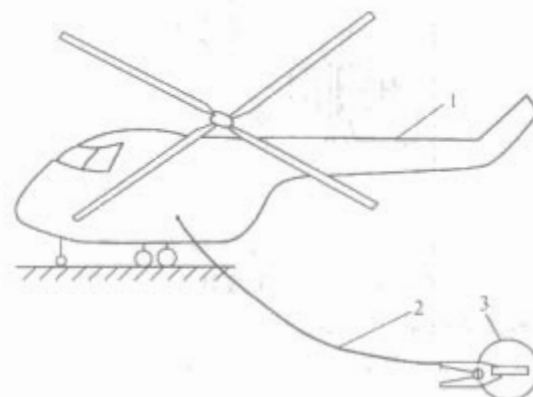


图 10.3-18 舰载直升机停放、维修和地勤作业接地
1—直升机；2—专用接地线（I）；3—接地装置

(2) 直升机在舰船上加油时，不仅直升机与接地装置接地，同时，必须再使用一根专用接地线，其一端夹接地装置上，另一端夹在输油口法兰盘的接地铜片上，见图 10.3-19。

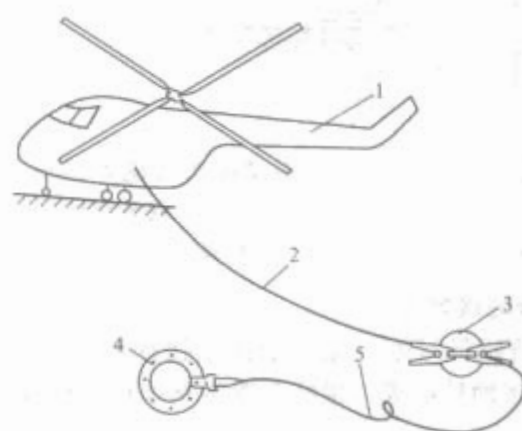


图 10.3-19 直升机加油作业接地
1—直升机；2—专用接地线（I）；3—接地装置；
4—输油管法兰；5—专用接地线（II）

(3) 直升机在舰面悬停作业时，将专用接地线一端夹在舰上接地装置上，另一端高压静电放电棒由作业人员手持并钩住直升机吊缆，直至作业结束，见图 10.3-20。

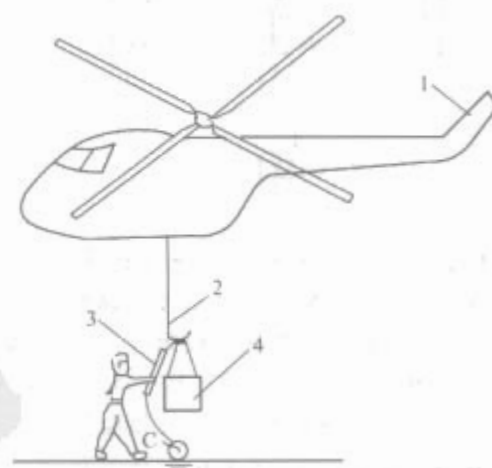


图 10.3-20 直升机悬停作业接地
1—直升机；2—直升机吊缆；
3—专用接地线（III）；4—负载

3.3.6 风雨密门、窗、盖的接地

风雨密门、窗、盖的接地,见图 10.3-21。

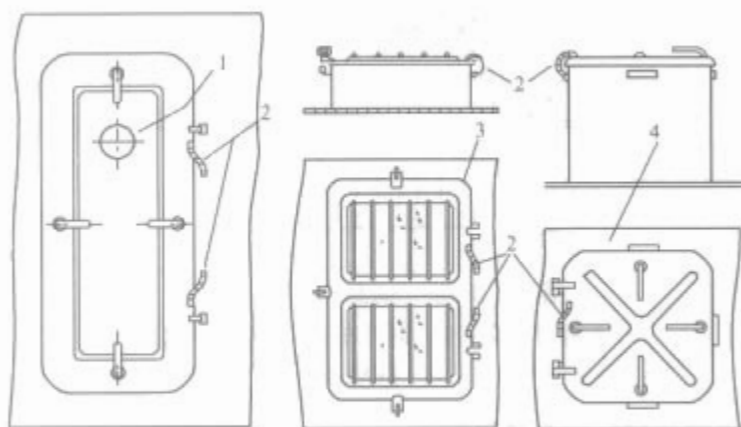


图 10.3-21 风雨密门、窗、盖的接地
1—风雨密门; 2—搭接条; 3—天窗; 4—金属盖

3.3.7 栏(桅)杆索具接地

栏(桅)杆索具接地,见图 10.3-22。

3.3.8 舷梯活动处接地

舷梯活动处接地,见图 10.3-23。

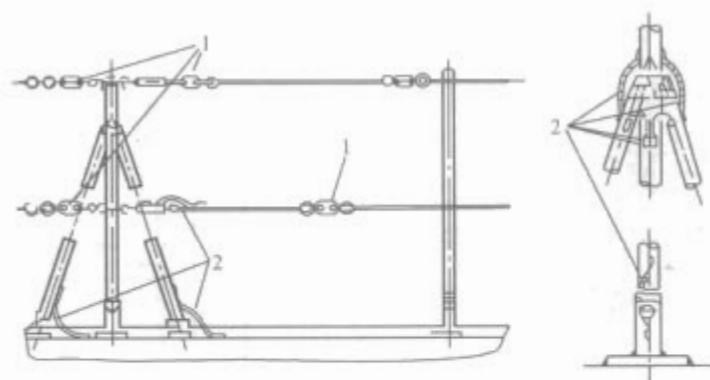


图 10.3-22 栏(桅)杆索具的接地
1—绝缘链环; 2—搭接条

3.3.9 吊艇架活动处接地

吊艇架活动处接地,见图 10.3-24。

3.3.10 露天部位金属直梯、斜梯的接地

露天部位金属直梯、斜梯的接地,见图 10.3-25。

3.3.11 天线和钢丝拉索的接地

天线和钢丝拉索的接地,见图 10.3-26。

3.3.12 汽笛、雾笛拉索的接地

汽笛、雾笛拉索的接地,见图 10.3-27。

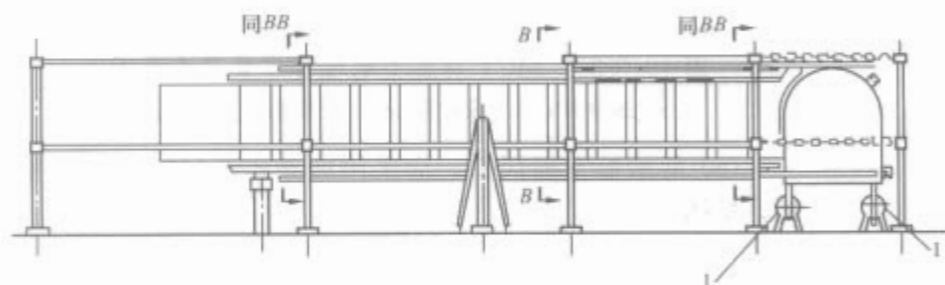


图 10.3-23 舷梯的接地和绝缘
1—搭接条; 2—木垫块

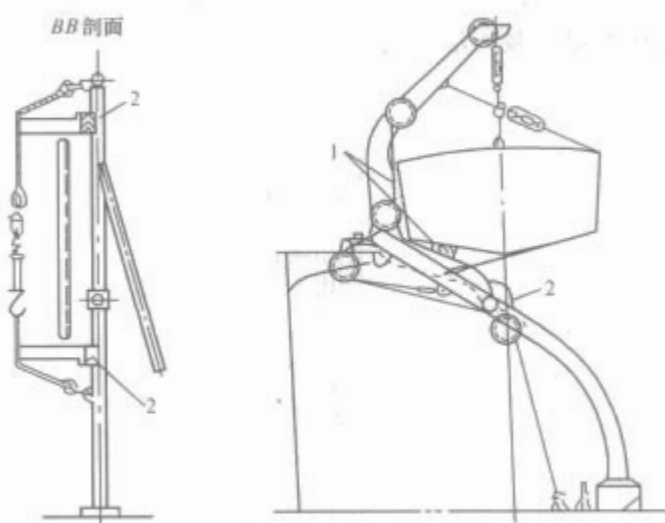


图 10.3-24 吊艇架的接地
1—木垫块; 2—搭接条

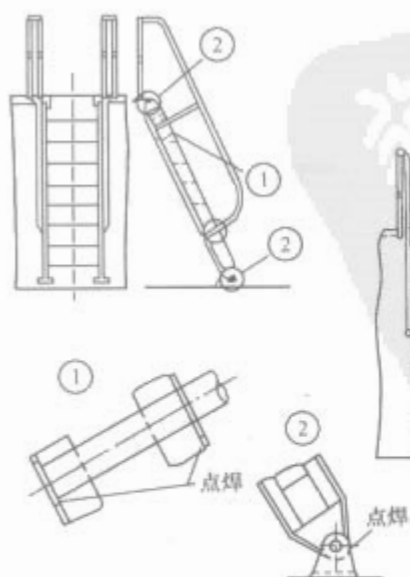


图 10.3-25 直梯和斜梯的接地

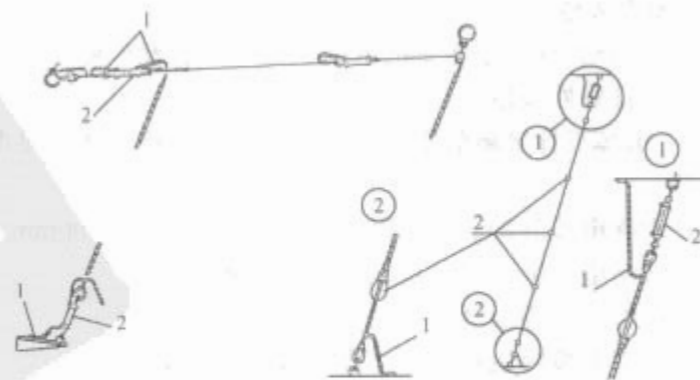


图 10.3-26 天线和钢丝拉索的接地
1—搭接条; 2—绝缘子

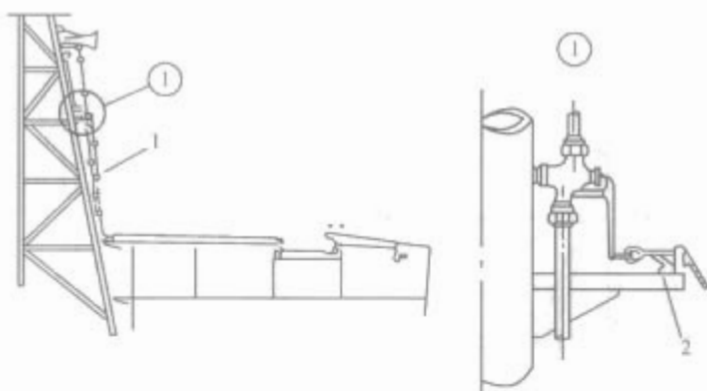


图 10.3-27 汽笛、雾笛拉索的接地
1—绝缘子；2—搭接条

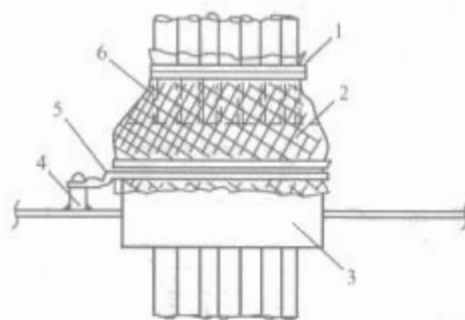


图 10.3-29 铜丝网屏蔽接地
1—不锈钢扎带；2—铜丝网；3—电缆（筒）；
4—接地柱；5—搭接条；6—锡箔片

4 屏蔽工艺

(1) 屏蔽舱室的金属围壁、门和窗应形成一个连续导电面，其面上任何两点间的电阻应不大于 $10\text{m}\Omega$ 。屏蔽舱室的门应采用屏蔽门，外门采用屏蔽型水密门，门铰链处要用搭接条接地。门框四周采用磷铜弹簧片接触，关门后保持连续屏蔽。

(2) 与屏蔽舱室无关的金属管路、波导管、电缆不允许进入屏蔽舱室。

(3) 舰船露天区域敷设的所有电缆，应加以屏蔽，暴露长度大于 1m 的电缆，应敷设在电缆管或电缆槽内。露天区域电缆槽安装方法见图 10.3-28。

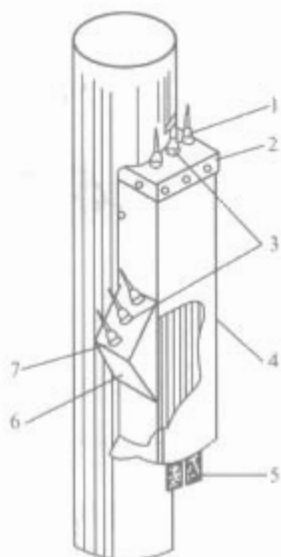


图 10.3-28 露天区域电缆槽安装方法
1—热收缩套管；2—电缆槽盖；3—填料函；
4—电缆槽；5—屏蔽及非屏蔽电缆；6—分电缆槽；
7—接地附件

(4) 所有贯穿屏蔽舱室的金属管路（包括风管），应在贯穿处周边接地。

(5) 所有贯穿屏蔽舱室的电缆，必须在舱壁外侧不大于 150mm 处良好处接地。

(6) 电缆贯穿屏蔽舱室采用铜丝网屏蔽接地方法，见图 10.3-29。

1) 剥除电缆外护套，暴露屏蔽层长度约 $200\sim 300\text{mm}$ 。

2) 清洁电缆屏蔽层，直至露出金属光泽。

3) 电缆包裹锡箔纸。

4) 清洁电缆筒包扎部分，直至露出金属光泽。

5) 用 $2\sim 3$ 层的 300 目铜丝网包裹电缆和电缆筒连接处。

6) 用搭接条连接铜丝网和舱壁接地附座。

7) 用不锈钢扎带包扎铜丝网与电缆筒连接处和铜丝网

与电缆连接处，并垫锡箔片。

(7) 电缆贯穿屏蔽舱室时也可用 MCT 屏蔽型电缆贯穿装置屏蔽接地，安装方法见图 10.3-30。

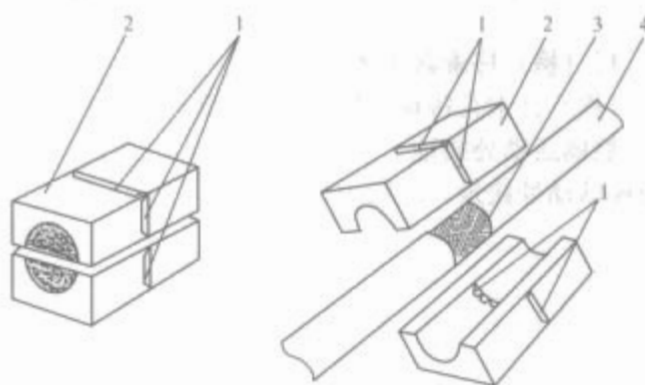


图 10.3-30 MCT 屏蔽型电缆贯穿装置安装图
1—接地铜片；2—橡胶模块；3—屏蔽层；4—电缆

(8) 屏蔽舱室通风口，应采用波导式通风隔栅屏蔽接地，见图 10.3-31。

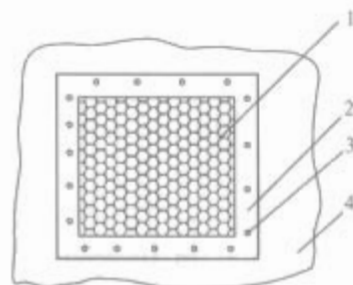


图 10.3-31 波导式通风隔栅接地
1—通风隔栅；2—压板；3—紧固螺栓；4—舱壁

(9) 金属外壳救生筏与船体的绝缘，见图 10.3-32。

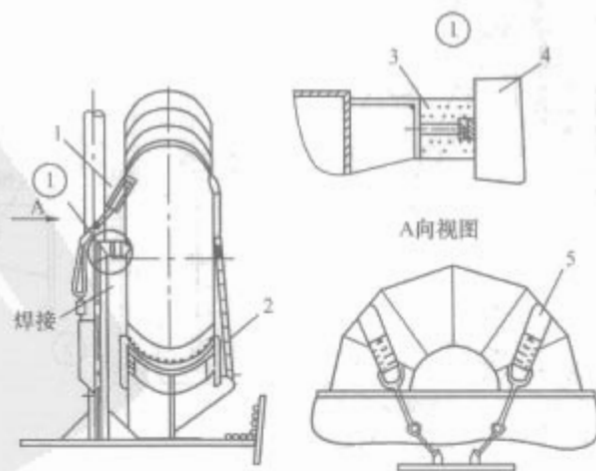


图 10.3-32 金属救生筏的绝缘垫
1—紧捆器；2—木条；3—木垫；
4—金属救生筏；5—橡胶传送带系索

5 滤波工艺

(1) 交流电网的电压波形畸变率, 单次谐波成分及直流电网波纹电压, 应符合 HJB 34 的有关规定。

(2) 交流电网输出电源线上的瞬变脉冲, 应小于 1.75 倍。

(3) 为抑制配电系统的传导干扰, 对脉冲干扰和瞬变干扰较为敏感的设备, 如无线电通信设备, 计算机情报中心、指挥仪及数据处理设备等, 应通过滤波器供电。

(4) 滤波器应安装在舱室外, 从滤波器进入舱室的电缆应尽量短, 滤波器外壳必须可靠接地。

(5) 滤波器的输入、输出线应严格分开, 尽量采取隔离措施, 以防止输出与输入线耦合。

(6) 电源配电系统的电源线与地之间接地电容应尽量少用, 必要时, 其容量应不大于 $0.1\mu\text{F}$ (50Hz) 或 $0.2\mu\text{F}$ (400Hz)。

6 绝缘工艺

舰船甲板上的索具, 如天线拉索、升降拉索以及类似的绳索尽量采用非金属材料, 栏杆金属索具应用绝缘环隔开, 以减少二次辐射的强度。

吊艇架钢丝拉索的绝缘见图 10.3-33。

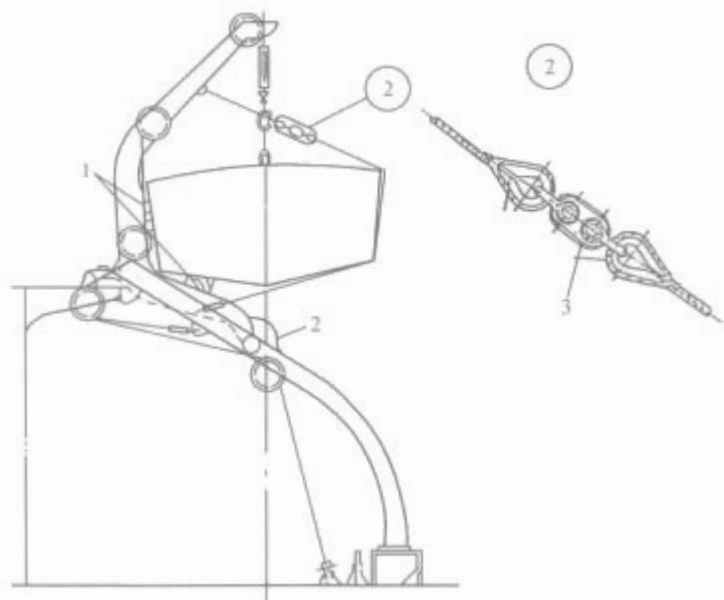


图 10.3-33 吊艇架的绝缘环

1—木垫块; 2—搭接条; 3—绝缘链环

金属救生筏的绝缘见图 10.3-32。

7 特殊电缆敷设防干扰工艺

(1) 武备的点火电缆应单独敷设, 并应连续屏蔽。

(2) 为减少低频电缆造成的磁场辐射, 在有显控装置的舱室及报房内不应通过消磁绕组电缆, 否则应敷设在电缆管内。

(3) 低频、低电平电缆应敷设在电缆管内。

8 防干扰遮挡板和雷达吸波材料的施工

为了减少雷达、电子战之间干扰, 增加收发隔离度, 舰船上经常在发射天线和接收天线之间安装防干扰遮挡板, 但是往往需要做试验后才能确定结构尺寸, 效果也不甚理想。

舰船上更多采用雷达吸波材料, 吸波材料大部分在涂料中加进微波吸收成分的复合材料制造而成, 施工时需要反复多次涂敷达到一定厚度, 才能有效。

国外报道, 采用雷达吸波材料涂敷后, 一艘护卫舰的有效截面可以下降 16dB, 即从 2500m^2 减少到 600m^2 。

9 防护强电磁场辐射的工艺措施

(1) 强功率发射天线 (无线电通信、雷达、电子战、卫星通信的发射天线) 附近, 功率密度较大, 为防止人员伤害, 应设警戒标志线、标志牌, 并应采用设围栏等隔离措施。

(2) 电气设备和电缆应尽量远离强功率发射天线。

(3) 强功率发射天线附近的金属扶手, 应加塑料护套, 以防止高频感应电压灼伤。

(4) 发射天线附近的输油管接口、燃油口等金属物件, 应磨平、不应毛刺和尖角, 附近的所有活动部件应严格有效接地。

10 检验规则

(1) 检查接地有效性和可靠性。

(2) 检查所有搭接条形式选用和焊接方法是否正确与完整。

(3) 检查电缆管、波导管、金属管、电缆槽等安装质量, 屏蔽是否连续, 接地是否可靠。

(4) 检查舱面金属构件接地或绝缘的质量。

(5) 检查天线安装质量, 接触点应接触良好, 接地应有效可靠。绝缘子应清洁无油污, 发射时天线周围应无打火现象。

(6) 检查发射天线附近金属体防护措施, 接地应有效可靠, 金属物件应无毛刺和尖角等现象。

(7) 检查屏蔽、滤波及绝缘的安装质量和可靠性。

(8) 接地电阻和绝缘电阻检测。

1) 用毫欧计测量接地电阻, 直流电阻值应不大于 $10\text{m}\Omega$ 。

2) 用毫欧计测量计算机信号地接地系统电阻, 主接地系统直流电阻应小于 $2.5\text{m}\Omega$, 分接地系统的接地直流电阻应小于 $7.5\text{m}\Omega$, 电缆与舰体焊接的接地直流电阻应不大于 $1\text{m}\Omega$ 。

3) 用高阻计 (500V) 检查绝缘子的绝缘电阻值应大于 $10\text{M}\Omega$ 。

(9) 设备通电检查, 观察无线电通信效果, 观察雷达、导航等显示屏有无闪烁抖动现象及计算机传输有无干扰。

参 考 文 献

- [1] 广州造船厂《船电工艺手册》编写组. 船电工艺手册: 第1分册. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [2] B. E. 凯瑟. 电磁兼容原理. 肖华庭, 诸晶盾, 等译. 北京: 电子工业出版社, 1990.
- [3] 陈穷. 电磁兼容工程设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [4] 卢礼芬. 环境电磁兼容控制基础. 北京: 兵器工业出版社, 1989.



[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]
书名=中国电气工程大典 第12卷 船舶电气工程
作者=马伟明主编
页数=892
s s 号=12176321
出版社=中国电力出版社
出版日期=2009 . 01

封面
书名
版权
前言
目录
正文